



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA AL
DESGASTE DE LAS PLACAS DE ACERO DE UN EQUIPO DE
MOLIENDA PARA MINERÍA”**

CÓRDOVA MORALES LORENA NOEMÍ

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: TRABAJO EXPERIMENTAL

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2017-04-18

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

CÓRDOVA MORALES LORENA NOEMÍ

Titulado:

**“ESTUDIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA AL
DESGASTE DE LAS PLACAS DE ACERO DE UN EQUIPO DE MOLIENDA
PARA MINERÍA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Julio Cesar Villavicencio Cevallos
DIRECTOR

Jorge Isaías Caicedo Reyes
MIEMBRO

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CÓRDOVA MORALES LORENA NOEMÍ

TRABAJO DE TITULACIÓN: “ESTUDIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LAS PLACAS DE ACERO DE UN EQUIPO DE MOLIENDA PARA MINERÍA”

Fecha de Examinación: 2018-03-14

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Julio Cesar Villavicencio Cevallos DIRECTOR			
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Lorena Noemí Córdova Morales
Cédula de Identidad: 180452822-0

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Lorena Noemí Córdova Morales, declaro que el presente trabajo de titulación es de mí autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Córdova Morales Lorena Noemí
Cédula de Identidad: 180452822-0

DEDICATORIA

Principalmente dedico mi logro a Dios por la fortaleza y porque ha permitido que alcance unos de los sueños más anhelados a lo largo de mi vida.

A mis padres; Laura Morales la mujer que me enseñó la bondad, aquella persona que estuvo conmigo en las noches más oscuras y nunca me abandonó, Isaías Córdova ese gran ser que siempre será un ejemplo de responsabilidad y honestidad, todo lo bueno que llegue a ser en la vida será por ustedes y sus enseñanzas.

A mis hermanos por ser mis confidentes, animarme cuando me sentía vencida, ellos que confiaron en mí cuando yo misma no lo hacía.

A mis maestros que formaron parte de mi vida estudiantil, y que aportaron con sus conocimientos para cumplir con éxito una etapa de mi vida.

Lorena Noemí Córdova Morales

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la salud y vida para lograr mis metas, a mi familia por brindarme todo el apoyo y confianza para ver culminada una meta más de la vida.

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por darme la oportunidad de obtener una profesión, y ser una ayuda para la sociedad.

Agradezco al Ing. Julio Villavicencio e Ing. Isaías Caicedo, por brindarme su amistad y asesoramiento de la tesis, quienes con la ayuda de su conocimiento y experiencia se logró elaborar el presente documento.

Lorena Noemí Córdova Morales

ÍNDICE

Pág.

RESUMEN

ABSTRAC

INTRODUCCIÓN

1. CAPÍTULO I MARCO REFERENCIAL.	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Hipótesis	3
1.5. Alcance	4
1.6. Objetivos	4
1.6.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.6.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.	5
2.1. La minería en el Ecuador y su desarrollo.	5
2.1.1. <i>Geología del país</i>	5
2.1.2. <i>Los minerales y sus principales características.</i>	6
2.1.3. <i>Propiedades de los minerales.</i>	6
2.1.4. <i>Principales minerales que se extraen en el Ecuador.</i>	8
2.2. Fases de la explotación minera.	10
2.2.1. <i>Extracción</i>	11
2.2.2. <i>Trituración.</i>	11
2.2.3. <i>Molienda.</i>	12
2.3. Características, tipos y funcionamiento de los elementos moledores.	13
2.3.1. <i>Tipo de elementos moledores.</i>	13

2.3.2.	<i>Características de funcionamiento según el tipo.</i>	13
2.3.3.	<i>Tipos de materiales utilizados en la fabricación de placas de molienda.</i>	17
2.4.	Características de trabajo y tipos de desgaste que sufren los elementos moledores.	18
2.4.1.	<i>Características de trabajo.</i>	18
2.4.2.	<i>Tipos de desgaste de los elementos moledores.</i>	18
2.5.	Tecnologías de mejoramiento	20
2.5.1.	<i>Acritud (endurecimiento por trabajo en frio).</i>	20
2.5.2.	<i>Solución solida (química).</i>	21
2.5.3.	<i>Tratamientos térmicos.</i>	22
2.5.3.1.	<i>Temple o endurecimiento del acero.</i>	24
2.5.3.2.	<i>Velocidad de calentamiento y de enfriamiento.</i>	24
3.	CAPÍTULO III TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DEEXPERIMENTACIÓN.	27
3.1.	Espectrometría aplicada en una probeta extraída de las placas motivo de estudio.	28
3.2.	Desarrollo del procedimiento para la preparación metalográfica.	28
3.2.1.	<i>Corte.</i>	29
3.2.2.	<i>Desbaste y Pulido.</i>	29
3.3.	Ataque químico.	30
3.4.	Microscopia óptica.	31
3.5.	Ensayo de Dureza.	32
3.5.1.	<i>Dureza Brinell.</i>	32
3.5.2.	<i>Dureza Rockwell.</i>	33
3.6.	Tratamiento térmico.	34
3.7.	Desarrollo de las especificaciones para el ensayo de desgaste.	35
3.7.1.	<i>Cálculo del volumen perdido</i>	35
3.7.3.	<i>Estandarización de la muestras.</i>	37

3.7.4.	<i>Tipos de ensayos.....</i>	37
4.	CAPÍTULO IV DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.	39
4.1.	Obtención de muestras de la placa de acero	39
4.1.1.	<i>Procedimiento de corte</i>	39
4.1.2.	<i>Ensayo de Espectrometría aplicado en muestras tomadas de la placa de acero para conocer su composición química.</i>	40
4.1.3.	<i>Ensayo de tratamientos térmicos y ensayo de dureza aplicado en muestras tomadas de una placa de acero (elementos moledores de un molino).</i>	45
4.1.4.	<i>Ensayo de metalografía en muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente.</i>	60
4.1.5.	<i>Ensayo de desgaste de las muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente (elementos moledores).</i>	68
5.	CAPÍTULO V ANÁLISIS DE E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	83
5.1.	Resultados obtenidos en tratamientos térmicos y ensayos de dureza de las muestras.	83
5.2.	Resultados de ensayo de metalografía realizado en las muestras.....	87
5.3.	Resultados del ensayo de desgaste	89
6.	CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	94
6.1.	Conclusiones.	94
6.2.	Recomendaciones	95
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1-2: Escala Mohs de dureza de los Minerales	7
Tabla 2-2: Sulfuros composición y características	8
Tabla 3-2: Minerales no metálicos.	9
Tabla 1-3: Ataque químico para aleaciones ferrosas.	31
Tabla 2-3: Conversión de dureza estándar para metales según la norma ASTM E140-02	34
Tabla 3-3: Temperaturas recomendadas de acuerdo al contenido de carbono según la Norma ASTM A255-02 “ <i>Normalizing and Austenitizing Temperature</i> ”	35
Tabla 4-3: Medidas de granos para discos de desbaste y otros abrasivos	36
Tabla 5-3: Dimensiones estandarizadas según la Norma ASTM G65	37
Tabla 6-3: Parámetros de ensayos según la norma ASTM G65	38
Tabla 1-4: Procedimiento del Ensayo de Espectrometría aplicado en las muestras.	41
Tabla 2-4: Detalle de composición química presente en la muestra de la placa de acero.	43
Tabla 3-4: Aceros Austeníticos fundidos según la norma ASTM A128	44
Tabla 4-4: Aceros con alto contenido de manganeso. Composición química	44
Tabla 5-4: Procedimiento de ensayo para tratamientos térmicos.	45
Tabla 6-4: Procedimiento para el Ensayo de Dureza Brinell según norma ASTM E 10-02.	48
Tabla 7-4: Procedimiento para el Ensayo de Dureza Rockwell C según norma ASTM E18-17.	49
Tabla 8-4: Detalles del ensayo base o ensayo 1. Muestras en estado de suministro y Recocido.	51
Tabla 9-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 1, ensayo base.	52
Tabla 10-4: Detalles del ensayo 2. Muestras sometidas a recocido, temple, normalizado, temple y revenido.	52
Tabla 11-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 2.	54
Tabla 12-4: Detalles del ensayo 4. Muestras sometidas a temple en agua y aceite, y revenido.	55
Tabla 13-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 4.	56

Tabla 14-4: Detalles del ensayo 6. Muestras sometidas a temple en agua y aceite, y revenido.	57
Tabla 15-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 6.	59
Tabla 16-4: Aceros Austeníticos fundidos según la norma ASTM A 128.	60
Tabla 17-4: Aceros con alto contenido de manganeso. Principales propiedades mecánicas	60
Tabla 18-4: Procedimiento para ensayos de metalografía.	61
Tabla 19-4: Microindentación Vickers	67
Tabla 20-4: Procedimiento de obtención y secado del abrasivo para el ensayo de desgaste.	69
Tabla 21-4: Procedimiento del ensayo de desgaste en muestras según ASTM G 65	72
Tabla 22-4: Detalles de las muestras en estado de suministro.....	75
Tabla 23-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.	76
Tabla 24-4: Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en agua.	78
Tabla 25-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.	79
Tabla 26-4: Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.	80
Tabla 27-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.	81
Tabla 1-5: Resultados de tratamientos térmicos y dureza Brinell en las muestras.....	86
Tabla 2-5: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras en estado de suministro.	89
Tabla 3-5: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras tratadas térmicamente, temple en agua.	91
Tabla 4-5: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1-2: Ubicación geográfica de zonas mineras en el Ecuador	6
Figura 2-2: Etapas de la Explotación minera	11
Figura 3-2: Partes principales de un molino.....	12
Figura 4-2: Molino de barras	14
Figura 5-2: Ilustración del posicionamiento de las barrar dentro del molino.....	14
Figura 6-2: Molino de bolas	15
Figura 7-2: Molino de martillos	15
Figura 8-2: Molino de rodillos	16
Figura 9-2: Molino SAG.	16
Figura 10-2: Desgaste por adhesión	19
Figura 11-2: Desgaste por Abrasión.....	19
Figura 12-2: Modificación de las propiedades durante la deformación y el recocido posterior	21
Figura 13-2: Efectos de los elementos aleantes.....	22
Figura 14-2: Diagrama hierro carbono reducido	23
Figura 15-2: Tendencia de los elementos aleantes en el acero.....	26
Figura 1-3: Diagrama del procedimiento para el desarrollo de la investigación.....	27
Figura 2-3: Equipo para ensayos de espectrometría.....	28
Figura 3-3: Esmeril.....	29
Figura 4-3: Procedimiento de desbaste.....	30
Figura 5-3: Pulidora de disco	30
Figura 6-3: Microscopio Óptico	31
Figura 7-3: Durómetro.....	32
Figura 8-3: Microscopio con micrómetro.....	33
Figura 1-4: Placas del molino de construcción tipo manual utilizado para minería	40
Figura 2-4: Muestras sometidas a corte bajo especificación ASTM G65	40
Figura 3-4: Muestra 1, finalizado el ensayo de espectrometría.....	43
Figura 4-4: Muestra 2, en estado de suministro.	51
Figura 5-4: Muestra 4, Recocido a 925°C	54
Figura 6-4: Muestras templadas en aceite y agua y revenidas a 705°C	56

Figura 7-4: Microestructura en ASTM A128 en aceros austeníticos al manganeso, grado B-3.	63
Figura 8-4: Microestructura tomada a 100X, 200X y 500X en la muestra en estado de suministro.....	64
Figura 9-4: Microestructura tomada en la muestra 15 (Temple y Revenido), 100X, 200X y 500X.....	65
Figura 10-4: Microestructura tomada en la muestra 7 (Temple y Revenido), 100X y 500X	66
Figura 11-4: Muestras a ensayar en estado de suministro.	71
Figura 12-4: Muestras tratadas térmicamente, temple (925°C) y revenido (705°C).....	72
Figura 13-4: Material abrasivo utilizado durante el ensayo de desgaste para una muestra.	82
Figura 1-5: Durezas vs Tratamientos térmicos.....	85

LISTA DE ABREVIACIONES

ASM	Sociedad Americana de Materiales
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
C	Carbono
Mn	Manganeso
Au	Oro
Ag	Plata
Cu	Cobre
AG	Autógeno
SAG	Semiautógeno
Fe	Hierro
FCC	Cúbica Centrada en las Caras
BCC	Cúbica Centrada en el Cuerpo
HBW	Dureza Brinell con indentador de carburo de tungsteno
HRC	Dureza Rockwell C
EDS	Energy Disperse Spectrometry
XRD	X Ray Diffraction

LISTA DE ANEXOS

A	Ataque químico para aleaciones de hierro carbono Norma ASTM E407-07
B	Tabla de conversión de durezas
C	Ensayo 3: Tratamientos Térmicos
D	Ensayo 3: Pruebas de Dureza
E	Ensayo 5: Tratamientos Térmicos
F	Ensayo 5: Pruebas de Dureza
G	Análisis EDS en el límite de grano, muestra temple (agua) y revenido.
H	Análisis EDS dentro del grano, muestra en estado de suministro
I	Carburos distribuidos en toda la microestructura, muestra temple (agua) y revenido
J	Análisis EDS en el límite de grano, muestra en estado de suministro
K	Dureza Vickers para una carga de 300 gf
L	Guía de laboratorio para el ensayo de abrasión del acero.
M	Ficha de reporte del ensayo de hacer

RESUMEN

El deterioro de las placas molidoras de los molinos utilizados en minería motivó a realizar un estudio para aumentar la resistencia al desgaste de dichos elementos de manera que el mantenimiento por cambio de estas partes sea menor. El desarrollo del trabajo tiene como objetivo aumentar la resistencia al desgaste de las placas molidoras de los molinos para minería por medio de tratamientos térmicos de temple y revenido; esto implicó recopilar información sobre los materiales y tipos de desgaste de estos elementos. Posteriormente se realizó, la caracterización del material por técnicas metalográficas, se utilizó un espectrómetro con el cual fue posible conocer la composición química del acero. También se realizaron ensayos de dureza para establecer esta propiedad mecánica del acero en estado de suministro. Seguido a esto se realizaron tratamientos térmicos de temple y revenido en agua y en aceite bajo las siguientes condiciones: temperatura de austenización de 925° C y la temperatura de revenido de 705°C. Una vez realizados los tratamientos térmicos se sometió a pruebas de desgaste a 12: muestras 4 en estado de suministro, 4 temple y revenido en agua y 4 temple y revenido en aceite. Las microestructuras de las muestras presentan partículas ubicadas en diferentes regiones dependiendo del tratamiento térmico. Para verificar la composición de estas partículas se realizó un análisis EDS y microindentaciones Vickers con el fin de establecer la dureza de estas partículas con la matriz. Con el análisis EDS se determinó la presencia de carbono y manganeso. En conclusión, la espectrometría determinó que es un acero al manganeso con un porcentaje de 0,7%C, 13,3% Mn, 0,2%Si y con una dureza de 14HRC. Además, presentaba una microestructura austenítica. Las muestras templadas en agua y en aceite aumentaron la dureza a 24HRC y 21HRC respectivamente. La microestructura presentó una matriz austenítica con presencia de carburos presumiblemente de manganeso. Finalmente las muestras templadas en agua y revenido presentaron la mejor resistencia al desgaste. Realizar ensayos de X ray diffraction para determinar la composición química específica de los carburos presentes. Además, de un análisis EDS mapping para conocer la distribución de cada elemento.

Palabras clave: <DESGASTE>, <CARACTERIZACIÓN>, <COMPOSICIÓN QUÍMICA>, <TEMPLE>, <REVENIDO>, <MICRIESTRUCTURA AUSTENITICA>, <MICROINDENTACION>, <CARBUROS>, <MANGANESO>

ABSTRACT

The deterioration of the grinding plates of the mills used in mining, encouraged to develop a study to increase the wear resistance of these elements in order to lower the maintenance of the equipment. The aim of this research work is to increase the wear resistance of the grinding plates in the mining mills by means of thermal treatments of temper and tempering. Thus, important information about the materials and kinds of wear was collected. Later the material characterization was developed, through metallographic techniques, the same way the use of a spectrometer was necessary to find out the chemical composition of the steel. Hardness tests were made for establishing the mechanic steel properties in a supply state. The next step was some thermal treatments of temper and tempering in water and oil under the following conditions: austenization temperature 925C and tempering temperature 705C. Once all these treatments were developed, the next stage was to make wear testing at 12 samples: 4 in a supply state, 4 in water temper and tempering and 4 in oil temper and tempering. The microstructure of the samples shows particles located in different regions depending on the technical treatment. In order to verify the composition of these particles, an EDS analysis and micro indentation Vickers were done to establish the particles hardness at the matrix. Through the EDS analysis, the presence of carbon and manganese was determined. As a conclusion, the spectrometer determined that there is manganese steel at 0,7%C, 13,3%Mn, 0,2%Si and a hardness average of 14HRC as well as an austenitic microstructure. The samples tempered in water and oil increase the hardness at 24HRC and 21 HRC respectively. The microstructure presented an austenitic matrix with manganese carbides presence. Finally the temper and tempering samples in water showed a better wear resistance. As suggestion it must be necessary to make X ray diffraction tests to determine the specific chemical composition of the found carbides and an EDS mapping analysis to know each element distribution.

Keywords: <WEAR>, <CHARACTERIZATION>, <CHEMICAL COMPOSITION>, <TEMPER AND TEMPERING (THERMAL TREATMENT)>, <AUSTENITIC MICROSTRUCTURE>, < MICRO INDENTATION>, <CARBIDES>, <MANGANESE>.

INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica muy importante en muchos países alrededor del mundo. Dentro de los equipos utilizados en minería se encuentran los molinos con los cuales se pulveriza los fragmentos rocosos para extraer el mineral deseado a partir de la materia prima obtenida de los yacimientos.

Existen muchos equipos involucrados en la extracción de minerales. Uno de los equipos más importantes es el molino de minería. Involucrados a este molino se encuentran otros elementos como las muelas. Estas ayudan a triturar, aplastar y pulverizar la roca. Por sus condiciones de trabajo, estos elementos están sometidos a varios esfuerzos que provocan el deterioro significativo del molino. Para contrarrestar este deterioro, el material más popular utilizado para este tipo de equipos es el acero al manganeso.

El acero al manganeso es una combinación de Fe-C-Mn y es ideal para otorgar una dureza y resistencia aceptables. Sin embargo, debido a que la microestructura que presentan los aceros al manganeso es netamente austenítica y que la aplicación de tratamientos térmicos en este acero teóricamente no modifica esta microestructura, se cree que no es posible mejorar ciertas propiedades mecánicas.

No obstante, existen investigaciones que han estudiado los efectos de la aplicación de tratamientos térmicos en aceros al manganeso. Pese a que los estudios mencionados anteriormente han estudiado los efectos de la aplicación de tratamientos térmicos, estos no presentan valores de dureza y resistencia al desgaste a diferentes tratamientos térmicos. Este trabajo tiene como objetivo la aplicación de tres tipos de tratamientos térmicos con el fin de obtener el más adecuado para permita elevar la dureza y mejorar la resistencia al desgaste de un acero al manganeso utilizado en la industria minera para el proceso de triturado

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL.

1.1. Antecedentes

La minería es una actividad económica que se conoce como primaria ya que se extraen directamente de la Tierra, (MONREAL SAAVEDRA, y otros, 2015) de yacimientos que están al aire libre o en el subsuelo a diferentes niveles de profundidad. (Quimico Global S.A. y C.V., 2014)

En su inicio esta actividad se realizaba en su totalidad de forma manual, pero con el paso de los años la minería se convirtió en una actividad económica importante por lo que el hombre tuvo que desarrollar nuevas y mejores formas de extracción de minerales es así que en la época actual la industria minera utiliza un sin número de maquinaria con la cual facilita y aprovecha de mejor manera los recursos.

Dentro de los equipos primarios utilizados en minería se encuentran los molinos con los cuales se pulveriza los fragmentos rocosos con el fin de extraer el mineral en cuestión debido a que los minerales se encuentran mezclados en los yacimientos¹

Los molinos de minería son un conjunto de elementos mecánicos que cumplen con una función determinada, debido a la naturaleza de su trabajo estos elementos están sometidos a esfuerzos transitorios como: mecánicos, térmicos, desgaste, etc. el cual produce su deterioro, uno de los elementos fundamentales de los molinos son las muelas (elemento con el cual se tritura, aplasta y pulveriza la roca).

Los elementos moledores según el tipo de molino se clasifican en bolas, barras y placas, estos elementos se encuentran siempre en movimiento durante el funcionamiento del equipo y reciben directamente las cargas que se producen por el contacto directo con el material a pulverizar. Entre el deterioro que sufren estos elementos se encuentra la

¹ Roca donde se encuentra el mineral.

abrasión, golpeteo y vibraciones, los cuales producen un desgaste superficial el mismo que afecta su rendimiento.

En el 2014 el 78% de la producción de oro en el Ecuador proviene de la pequeña minería, difiriendo el contexto minero internacional, donde el 82% de la producción genera la gran minería y el 10% la pequeña minería. (Banco Central del Ecuador, 2017) En nuestro país la pequeña y mediana minería ha sido el eje principal de esta actividad.

Una gran cantidad de pequeñas industrias mineras utilizan molinos de placas para pulverizar la roca, por el trabajo que realizan los equipos estas placas tienen un tiempo de vida relativamente corto de dos a tres meses antes de sufrir un desgaste severo por lo cual deben ser remplazadas por nuevas placas, razón por la cual se requiere realizar un trabajo tipo experimental con el fin de mejorar la resistencia al desgaste del acero con el que están fabricadas las placas de los equipos de molienda.

Existen diversos métodos para aumentar la resistencia al desgaste de las placas de los equipos de molienda, entre ellos tenemos el endurecimiento por acritud, solución sólida y tratamientos térmicos. Los métodos de tratamientos térmicos usados en la presente investigación serán: temple (agua, aceite) y revenido.

Los tratamientos térmicos de temple se consideran una gran técnica para cambiar las propiedades de los aceros y sus aleaciones. De esta manera se buscara elevar la dureza del material.

1.2. Formulación del Problema

La falta de interés por el desarrollo de la pequeña minería del país por parte de los organismos estatales a pesar de que esta ha representado un alto porcentaje en la economía del país. Las condiciones de trabajo de las placas de los equipos de molienda provocan el desgaste y deterioro de los mismos, lo que conlleva al fin de su vida útil y posterior cambio de dichas piezas. En el sector minero este tipo de desgaste ocasiona un costo adicional en el mantenimiento de las máquinas.

Aumentar la resistencia al desgaste de las placas por medio de tratamientos térmicos de temple incluyen procesos metalúrgicos muy importantes ya que de acuerdo con el acero

del que estén fabricadas las placas se deberá calentar en la mufla hasta llegar a la temperatura de fusión para luego ser enfriadas en distintos medios (agua y aceite), seguido por un revenido de las muestras templadas y así determinar cuál de estos temple es el que nos da una mejor resistencia al desgaste.

1.3. Justificación

La pequeña minería en el Ecuador produce un ingreso económico importante para el país, por este motivo es importante buscar nuevas tecnologías que ayuden en el desempeño de esta actividad, mediante este documento se requiere aumentar la resistencia al desgaste de las placas de los molinos y de esta manera disminuir los costos que se generan por cambio de estos elementos.

El presente trabajo se lo realizará mediante la utilización de muestras o probetas de los elementos moledores, las mismas que serán sometidas a estudio metalográfico para su caracterización, de modo que se pueda determinar el tipo de acero. Luego se realizará tratamientos térmicos (temple y revenido) a un determinado número de probetas las cuales serán sometidas a ensayos de metalografía y posteriormente a ensayos de desgaste, de manera que se determinará una posible alternativa como solución a unos de los principales problemas dentro del sector minero.

La utilización de Tratamientos Térmicos de temple o templado y revenido se establece como una solución viable para aumentar o mejorar la resistencia al desgaste que presentan las placas de molinos, empleando normas internacionales y aplicando los conocimientos técnicos y científicos del Ingeniero Mecánico que garanticen la calidad de los mismos, aumentando el tiempo de vida útil de estos elementos y así optimizar recursos.

1.4. Hipótesis

El desgaste de los elementos trituradores que se encuentran en contacto con la roca en los procesos de molienda en el sector minero generan un coste adicional en el área de mantenimiento debido a su corto periodo de vida útil y posterior reemplazo; en base a lo descrito se establece, conocer que es posible aumentar la resistencia al desgaste del

material de los elementos trituradores que se encuentran en contacto con la roca, mediante la aplicación de tratamientos térmicos (temple y revenido).

1.5. Alcance

El alcance del presente trabajo tiene como fin estimar el incremento de la resistencia al desgaste alcanzado una vez que se sometan las muestras a tratamientos térmicos de temple y posterior a esto a ensayos de desgaste.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Realizar el estudio para el mejoramiento de la resistencia al desgaste de placas de acero de equipos de molienda utilizados en el sector minero.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Realizar el estudio de la metodología para aumentar la resistencia al desgaste de las placas de los molinos de minería.
- Caracterizar el material de los elementos moledores del equipo de molienda por medio de técnicas metalográficas.
- Elaborar la tecnología para aumentar la resistencia al desgaste de las placas.
- Análisis de resultados

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

El presente capítulo tiene por objetivo realizar el estudio del arte, sobre procesos de desgaste de los elementos moledores en equipos de molienda de minerales y los métodos de endurecimiento de los aceros y sus aleaciones, con el fin de establecer el método más adecuado para aplicar en las muestras extraídas de las placas de molienda. Para ello se va a abordar los siguientes conceptos como: la minería en el Ecuador, características, tipos y funcionamiento de los elementos moledores, tecnologías de endurecimiento de los aceros y sus aleaciones.

2.1. La minería en el Ecuador y su desarrollo.

La minería es la actividad productiva que extrae minerales valiosos de la tierra para luego ser procesados para darles diversos usos. Dependiendo del tipo de mineral que se extraiga la minería puede ser metálica y no metálica.

La minería con el paso de los años se ha transformado en una actividad importante en el desarrollo del país, siendo una actividad que genera grandes ganancias y promueve la creación de empleos, contribuyendo a la economía local y nacional.

Otro aspecto importante dentro de la minería es el uso adecuado de máquinas y equipos que estén acorde al avance y desarrollo tecnológico, es importante establecer este punto puesto que para evitar desperdicios de material y posibles contaminantes ambientales, los equipos deben encontrarse en perfecto estado de trabajo. (MINISTERIO DE MINERÍA - ECUADOR, 2016)

2.1.1. *Geología del país*

El potencial de los yacimientos en el Ecuador es diverso por esta razón se busca desarrollar la gran minería, manteniendo el apoyo a los sectores de explotación pequeña

y mediana, los mismos que representan el pilar principal del sector minero del país en la actualidad.

Las provincias que se destacan por su potencial minero son: Esmeraldas, El Oro, Imbabura, Zamora, Napo, Morona Santiago. Actualmente la provincia del El Oro lidera el porcentaje de extracción de minerales en Ecuador con un 85%. (SEDPGYM-ECUADOR, 2013)

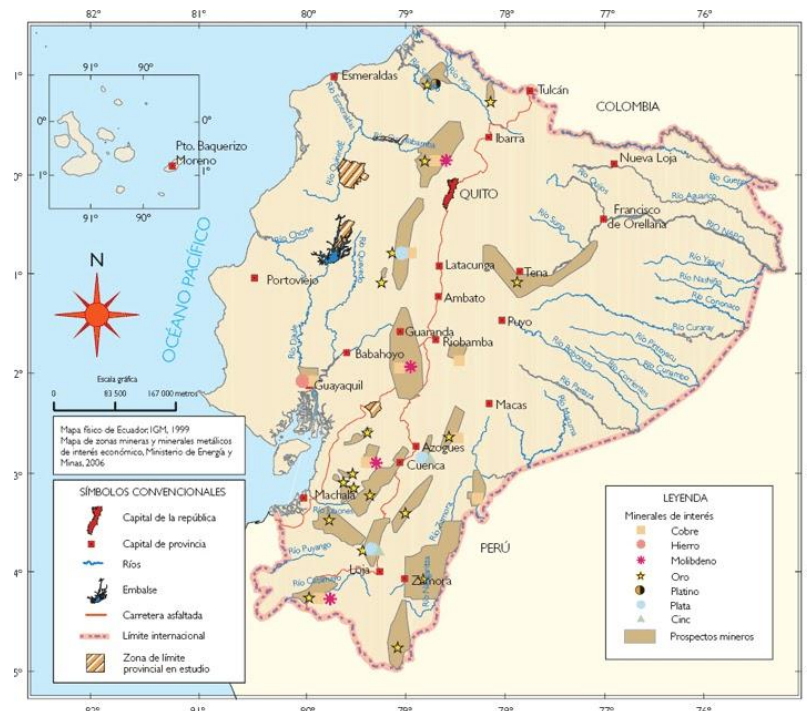


Figura 1-2: Ubicación geográfica de zonas mineras en el Ecuador
Fuente: (SEDPGYM-ECUADOR, 2013)

2.1.2. *Los minerales y sus principales características.*

Los minerales son sustancias naturales que se diferencian del resto por su origen inorgánico, composición química y comúnmente presentan una estructura cristalina. (Universidad Autonoma de Ciudad Juarez, 2016)

2.1.3. *Propiedades de los minerales.*

Dentro de las propiedades de los minerales tenemos las propiedades físicas y propiedades químicas.

- *Propiedades físicas.*

Las propiedades físicas son útiles para identificar a los minerales de acuerdo a las características que presenten, dentro de las propiedades físicas tenemos: fractura, dureza, tenacidad, peso específico, propiedades ópticas, propiedades electromagnéticas.

Debido a la importancia que tiene la dureza de los minerales en el desarrollo del presente trabajo a continuación se define dicha propiedad.

- *Dureza* .Se define como la capacidad que tiene el mineral para rayar o dejarse rayar por otros minerales u objetos. (DUQUE ESCOBAR, 2016) En la Tabla 1. se muestra la escala de dureza de los minerales y su equivalencia con objetos cotidianos.

Tabla 1-2: Escala Mohs de dureza de los Minerales

Dureza	Mineral	Equivalente diario
10	Diamante	Diamante sintético
intermedio	Carburo de silicio	Carborundo
9	Corindón	Rubí
8	Topacio	Papel abrasivo
7	Cuarzo	Cuchillo de acero
6	ortoclasa/feldespato	Corta plumas
5	Apatito	Vidrio
4	Fluorita	Clavo de hierro
3	Calcita	Moneda de bronce
2	Yeso	Uña del dedo
1	Talco	Polvos de talco

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (CALERO CALERO, y otros, 2015)

- *Propiedades químicas.*

De acuerdo a la composición química los minerales pueden pertenecer a los siguientes grupos: silicato, óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos y grupos menores.

- *Silicatos.* Se forman por la unión de un catión con SiO_4^{4-} y estos pueden ser ferromagnesianos y no ferromagnesianos. Los ferromagnesianos son silicatos de Fe y Mg oscuros y pesados mientras que los no ferromagnesianos son claros y no tan pesados esto ocurre por la ausencia de Fe y Mg. (DUQUE ESCOBAR, 2016) Algunos ejemplos de silicatos pueden ser: cuarzo, feldespatos, micas, etc.

- *Óxidos*. Son el resultado de la unión del oxígeno con algún elemento, los óxidos se encuentran en las principales menas de hierro, magnesio, cromo y aluminio. Otra de las características de los óxidos es que son menos duros que los silicatos y menos pesados que los sulfuros. (VALLEJO VELÁSQUEZ, 2014)
- *Sulfatos*. Resultan de la unión del anión $(SO_4)^{-2}$ con un catión.
- *Carbonatos*. Es la unión de un elemento con el anión $(CO_3)^{-2}$, dentro de este grupo se puede encontrar el mármol y la caliza. (DUQUE ESCOBAR, 2016)
- *Sulfuros*. Unión de un elemento con azufre; en este grupo se encuentran las minas más importantes de hierro, plata, cobre, mercurio, zinc y plomo. (VALLEJO VELÁSQUEZ, 2014) En la Tabla 2. se lista los principales prototipos de sulfuros y sus características.

Tabla 2-2: Sulfuros composición y características

Mineral	Composición	Características
Pirita	FeS_2	Color amarillo del latón, dureza 6,0 a 6,5
Galena	PbS	Peso específico 7,4-7,6 y muy buena exfoliación
Esfarelita	ZnS	Es el mineral de Zinc más importante (blenda)
Calcosita	CuS	Peso específico 5,7-5,8; dureza 2,5-3.0
Marcasita	FeS_2	Pirita blanca de color amarillo verdoso.
Cinabrio	HgS	Color rojo escarlata de brillo diamantino.

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (DUQUE ESCOBAR, 2016)

La pirita es el material que se encuentra en gran cantidad en los yacimientos de nuestro país del cual se extraerán el oro, plata, cobre, etc.

La pirita es un material muy conocido desde la antigüedad, su composición química es Fe: 46.55%, S: 53.45% y tiene una dureza de 6 a 6.5 en la escala de Mohs.

2.1.4. *Principales minerales que se extraen en el Ecuador.*

En el Ecuador existe una variada gama de minerales y estos pueden ser metálicos y no metálicos, de los cuales se extrae principalmente los siguientes:

2.1.4.1. *Minerales no metálicos.*

Son los que se aprovechan con finalidad distinta a la de extraer metales a pesar de que los contengan, entre los cuales se encuentran los minerales industriales que incluyen los de potasio y azufre, el cuarzo, la trona, la sal común, el talco, el feldespato y los fosfatos. Los minerales de construcción como el granito, el mármol, la caliza, etc. Las gemas o piedras preciosas como esmeraldas, diamantes, rubíes, etc. y, las gemas semipreciosas como: turquesa, cuarzo, jade, etc. los combustibles, entre ellos el carbón, el petróleo, el gas, etc. (Banco Central del Ecuador, 2017) En la Tabla 5 se muestran los principales minerales no metálicos que se explotan en el Ecuador.

Tabla 3-2: Minerales no metálicos.

Mineral	Descripción
Arcilla	Está constituida por silicatos de aluminio, de color blanco en estado puro.
Caliza	Es una roca sedimentaria compuesta por carbonato de calcio. Se utiliza en la fabricación de tejas, vidrios.
Caolín	Es un silicato de aluminio hidratado. Se usa en la fabricación de porcelanas.
Feldespato	Se usa en la industria del vidrio y la cerámica.

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

2.1.4.2. *Minerales metálicos*

Son aquellos minerales que se explotan con el fin de extraer el elemento metálico que contienen y estos pueden ser metales preciosos, metales siderúrgicos, metales básicos, etc. (Banco Central del Ecuador, 2017)

Entre los principales minerales metálicos que se extraen en el país son el cobre, oro y plata entre otros.

- *El cobre (Cu)*

El mineral cobre fue uno de los primeros metales empleados por el hombre por encontrarse en su estado nativo. Actualmente la producción de cobre se obtiene de minerales en forma de sulfuros: Calcopirita (CuFeS_2), Chalcocita (Cu_2S), Covelita (CuS), y minerales oxidados, como la cuprita (Cu_2O), la tenorita (CuO), etc.

Obtención de cobre a partir de los sulfuros: Se realizan múltiples etapas con los minerales como chancado, molienda y flotación obteniendo concentrados de cobre que luego

ingresan a procesos de tostación, fundición y refinación hasta obtener un cobre de pureza 99.99%. (ESTUDIOS MINEROS DEL PERÚ S.A.C, 2012)

- *El oro (Au) y la Plata (Ag)*

El oro y la plata son metales preciosos de color amarillo y blanco- grisáceo respectivamente, en su mayoría se los utiliza en joyería y en porcentajes menores se los utiliza en la industria; sobre todo en la electrónica. La plata al alearse con otros metales posee una gran conductividad térmica y eléctrica. (Banco Central del Ecuador, 2017)

2.2. Fases de la explotación minera.

En la actividad minera existen siete fases o etapas y estas son: Prospección, exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación, comercialización. En la Figura 2. se esquematiza las siete fases que existen en la explotación minera.

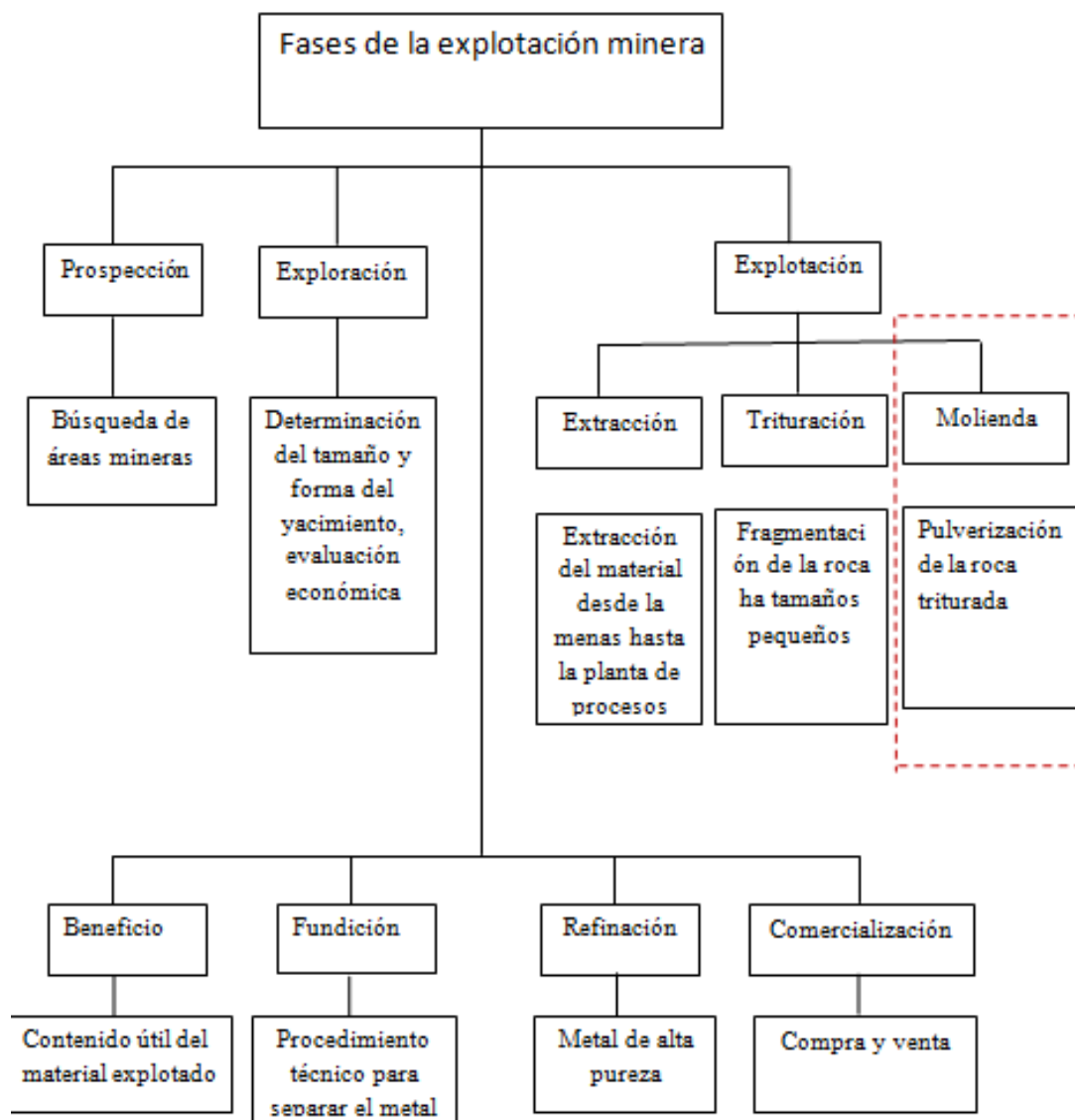


Figura 2-2: Etapas de la Explotación minera

Fuente: Autor

2.2.1. *Extracción.*

En esta etapa se realiza la perforación y voladuras del mineral en el interior de la mina, dejando expedito el mineral para su traslado al exterior. (ESTUDIOS MINEROS DEL PERÚ S.A.C, 2012)

2.2.2. *Trituración.*

A este proceso también se lo conoce como chancado y consiste en reducir el tamaño de la roca, este proceso suele ser repetitivo, es decir que la roca pasa por tres niveles de trituración antes de ser llevado a la siguiente fase que es la molienda.

2.2.3. *Molienda.*

La molienda es el último escalón de la fragmentación industrial, sigue a la trituración normalmente, y se caracteriza por el tamaño de salida de los productos. (ANDREA BLANCO, 2012)

La molienda es un proceso en el cual se reduce el tamaño de las rocas y minerales de manera similar a la trituración. El producto obtenido por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Generalmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a una pulgada, siendo el grado de desintegración mayor al de trituración. (INDUSTRIAS I, 2015)

2.2.3.1. *Partes constitutivas de los molinos para minería.*

Los molinos son máquinas robustas debido al trabajo que realizan y están compuestas de varios elementos, pero entre sus partes principales tenemos: Boca de alimentación, boca de descarga, cuerpo o cilindro y elementos moledores.

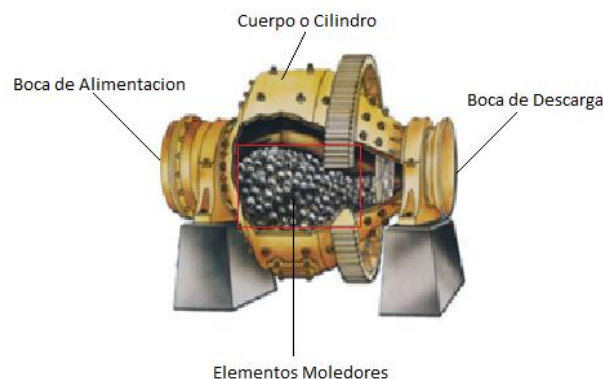


Figura 3-2: Partes principales de un molino

Fuente: (INDUSTRIAS I, 2015)

- *Boca de alimentación.* Por esta parte se incorpora el material triturado como su nombre lo indica alimenta de material al proceso.
- *Cuerpo o cilindro.* Es la parte misma donde se almacena el material que va a ser pulverizado o molido.
- *Boca de descarga.* Es por donde sale el material una vez que ha alcanzado el tamaño requerido por el proceso de molienda.

- *Elementos moledores.* Estos elementos corresponden a la parte más importante de los molinos ya que ellos son los encargados de realizar el trabajo de molienda, aplastan el material hasta lograr un tamaño milimétrico, estos elementos pueden ser de varios tipos de acuerdo al tipo de molino y el tipo de trabajo que se realice.

2.3. Características, tipos y funcionamiento de los elementos moledores.

Los elementos moledores o llamados también molturadores² son la parte principal de los molinos, por la naturaleza de trabajo que realizan deben ser lo suficiente mente duros para aplastar al material extraído de las menas y a su vez contar con otras características entre ellas tenemos resistencia al desgaste. Pero se debe tomar en cuenta que son partes reemplazables es decir en el tipo de mantenimiento que se lleve a cabo estos elementos serán sustituidos por otros.

2.3.1. Tipo de elementos moledores.

Dependiendo del tipo de elementos moledores con los que trabaje un molino, este toma su nombre y principales características de funcionamiento, estos elementos pueden ser: bolas, barras o placas.

2.3.2. Características de funcionamiento según el tipo.

Las máquinas en las cuales se realiza el proceso de molienda se las denomina molinos. Existen diversas clases de molinos y estos son:

- *Molino de Barras.*

El molino de Barras está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior cuenta con barras cilíndricas sueltas dispuestas a lo largo del eje, de longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino. La rotura del material se da por el contacto de las barras con el cuerpo del molino o a su vez el contacto entre barras.

² Tritura, aplasta, pulveriza

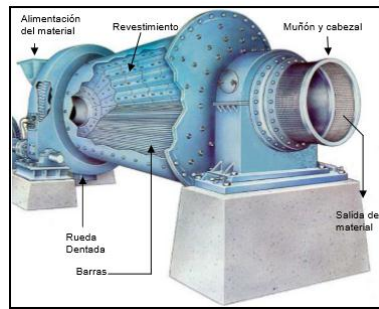


Figura 4-2: Molino de barras
Fuente: (INDUSTRIAS I, 2015)

Estos molinos trabajan en la trituración primaria es decir que el producto obtenido con esta molienda no es muy uniforme, debido a que las barras producen en la entrada un esponjamiento producido por los granos mayores, esto genera que los fragmentos más pequeños no se puedan seguir triturando.



Figura 5-2: Ilustración del posicionamiento de las barras dentro del molino

Fuente: (ANDREA BLANCO, 2012)

Las barras hacen un efecto matiz es así que no pueden pasar los fragmentos muy grandes, esta característica es la que hace que el molino de barras no produzca una molienda fina.

- *Molino de Bolas.*

Los molinos de bolas al igual que los molinos de barras están formados por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, en su interior en lugar de barras tiene esferas que se encuentran libres las mismas que al girar el cilindro se impactan entre sí o con el cuerpo del molino triturando los fragmentos rocosos. (INDUSTRIAS I, 2015)

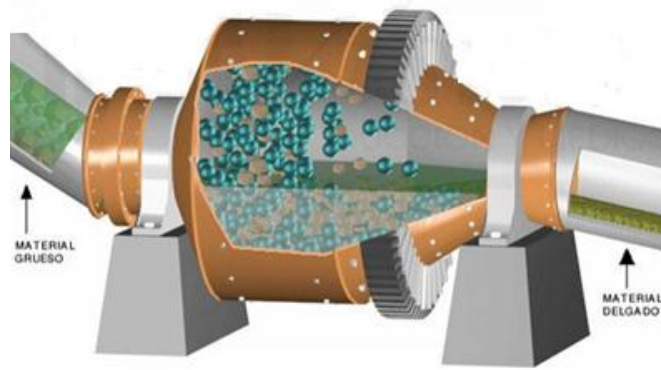


Figura 6-2: Molino de bolas
Fuente: (AGUILAR SCHAFFER)

Los molinos de bolas son utilizados por lo general en procesos finales ya que el producto es fino y homogéneo a diferencia de lo obtenido con los molinos de barras.

- *Molino de martillo.*

Este tipo de molinos funcionan por golpeteo de esta manera desintegran la roca.

Cabe aclarar que este tipo de equipo sirve para pulverizar el material, la limitación en su trabajo es la baja dureza y abrasión de los minerales que tritura.



Figura 7-2: Molino de martillos
Fuente: (Buffalo)

- *Molino de rodillo.*

Este tipo de molinos es muy utilizado en la industria cementera, este equipo está formado por tres rodillos que se encuentran ubicados a presión por acción de unos cilindros hidráulicos.

El material es aplastado por los rodillos múltiples veces hasta que alcanzan un tamaño tan pequeño que por fuerza centrífuga es empujado a los extremos del equipo.

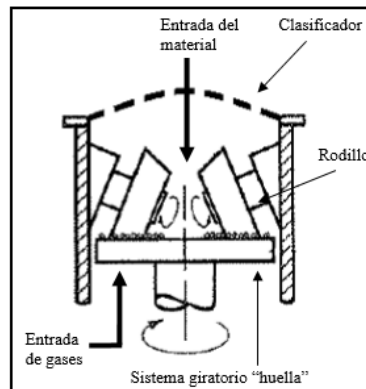


Figura 8-2: Molino de rodillos

Fuente: (INDUSTRIAS I, 2015)

- *Molinos autógenos (AG) y semiautógenos (SAG).*

En los años 80 se desarrolla un nuevo tipo de molienda denominadas autógena y semiautógena, con esta nueva forma de molienda se reduce costos en gastos energéticos y además que la molienda se reduce a una sola etapa. (INDUSTRIAS I, 2015)

Este sistema saca ventaja de los fragmentos rocosos grandes, los mismos que trituraran a los más pequeños, estos equipos son robustos debido al trabajo que realizan.

Pero cabe aclarar que por su principio de funcionamiento los molinos autógenos y semiautógenos no son buenos para la producción de granos finos.



Figura 9-2: Molino SAG.

Fuente: (AGUILAR SCHAFER)

2.3.3. *Tipos de materiales utilizados en la fabricación de placas de molienda.*

En ésta parte del equipo de molienda es primordial que el material de su fabricación presente características que satisfagan las exigencias requeridas. Es así que estos elementos son fabricados con materiales de elevada dureza y resistencia al desgaste. Por lo general son de fundición blanca o aleaciones de acero como el acero al manganeso también conocidos bajo la norma ASTM A128 como aceros Hadfield o aceros austeníticos. Debido a sus propiedades son muy utilizados en la industria principalmente en equipos y maquinarias que están sometidos a grandes esfuerzos abrasivos de trabajo.

Acero al manganeso.

El acero austenítico al manganeso es un acero aleado que al momento de su descubrimiento (Sir Robert Hadfield - 1882) presentó una composición de manganeso 12% y carbono 1.2% y combinó buenas propiedades como alta dureza y ductilidad con alta capacidad de resistir trabajo pesado y gran resistencia al desgaste. (HIGUERA COBOS, y otros, 2010)

Estos aceros al manganeso poseen una dureza Brinell que oscila entre HBW170-HBW220. El alto contenido de manganeso de estas aleaciones consigue estabilizar la austenita, aunque el contenido de carbono sea alto, la adición de otros elementos aleantes, como molibdeno y silicio facilita el temple de este acero y la posibilidad de endurecimiento por la formación de carburos precipitados en la matriz austenítica. (GARCÍA, y otros, 2010)

Estos aceros a una temperatura ambiente poseen una estructura estable. Por las condiciones de su composición química es muy utilizado en la industria debido a las grandes condiciones de durabilidad y resistencia al desgaste que presenta.

- *Fundición blanca.*

La fundiciones blancas utilizadas en minería son fundiciones de alta aleación y en la industria pesada son fundiciones aleadas de entre estas se destaca la Fundición blanca al níquel – cromo, esta aleación es muy utilizada en las parte moledoras de los molinos para minería.

- *Fundiciones blancas al níquel – cromo*

Esta fundición está compuesta por un porcentaje de níquel del 4,5%, 2% de cromo y apenas un 0.05% silicio, puede alcanzar durezas de entre 500 HBW A 750 HBW (CASTRO, 2009)

2.4. Características de trabajo y tipos de desgaste que sufren los elementos moledores.

Los elementos trituradores o moledores constituyen la parte fundamental ya que estos son los encargados de realizar el trabajo mismo de molienda. Estos elementos están fabricados de aleaciones resistentes al desgaste como fundición blanca, aceros al molibdeno, aceros al manganeso, pero a pesar de ser materiales de grandes resistencias los problemas de deterioro son inminentes debido al trabajo que realizan en el proceso de molienda.

2.4.1. Características de trabajo.

Su deterioro es proporcional al tiempo de trabajo, la naturaleza de operación en los molinos obliga el contacto directo del material con el equipo, por esta razón se produce un efecto de desgaste el mismo que dependerá de las cualidades abrasivas del material a moler, es así que el programa de mantenimiento de molinos hace un énfasis en el cambio de los elementos molturadores.

La acción principal en el interior de los molinos es la abrasión que se produce porque al girar el cilindro, la masa que está en su interior se desplaza sobre la misma produciendo un gran roce entre las partículas y los elementos molturadores. (ANDREA BLANCO, 2012)

2.4.2. Tipos de desgaste de los elementos moledores.

El desgaste puede definirse como el daño superficial sufrido después de determinadas condiciones de trabajo a las que se someten los materiales, pudiendo llegar a afectar a la sub-superficie. El resultado de este desgaste es la pérdida de material, como subsiguiente la reducción de medidas y pérdida de tolerancias. (CAÑIZARES SILVA, y otros, 2017)

Los equipos de molienda en específico los elementos molidores se ven afectados por dos tipos de desgaste principalmente y estos son: desgaste por adhesión y desgaste por abrasión.

- *Desgaste por adhesión.*

Ocurre por la destrucción de los enlaces de atracción que mantienen unidos a los átomos de las dos superficies en contacto. (CALERO CALERO, y otros, 2015) El deslizamiento de una superficie sobre otra produce que se desprenda material del menos resistente y se adhiera al otro. En la Figura 10-2 se representa los efectos que produce el desgaste por adhesión en los materiales.

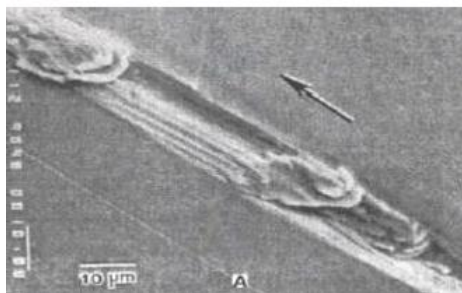


Figura 10-2: Desgaste por adhesión
Fuente: (ASM International Handbook Committee, 1990)

2.4.2.1. *Desgaste por abrasión.*

Se dan como la remoción del material de la superficie cuando permanecen atrapadas partículas duras entre las dos superficies en contacto, provocando el desprendimiento del material y/o la penetración en la superficie de menor dureza de entre las dos (CALERO CALERO, y otros, 2015), este desgaste es independiente de las condiciones de trabajo es decir se produce en seco o húmedo. En la Figura 11-2. Se puede visualizar los efectos de la abrasión en los materiales.

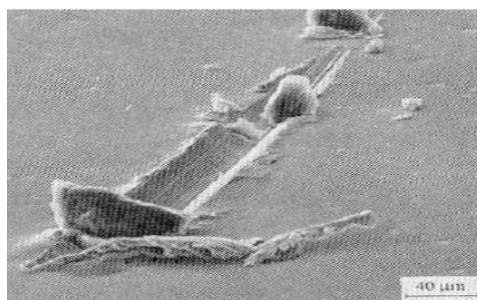


Figura 11-2: Desgaste por Abrasión
Fuente: (ASM International Handbook Committee, 1990)

2.5. Tecnologías de mejoramiento

El mejoramiento hace énfasis en reformar las características del material con la finalidad que la durabilidad en un trabajo específico aumente. Después de conocer los problemas que presentan el elemento motivo de investigación, es necesario buscar la forma de mejorar dicha situación utilizando métodos o técnicas establecidas y recomendadas por algunos autores.

En el ámbito de la metalografía se presentan una extensa gama de tecnologías aplicables dependiendo de las necesidades o exigencias del trabajo, el elemento motivo de investigación trabajan a impacto y desgaste. Según la ciencia de los materiales existen varios métodos para cambiar las propiedades mecánicas de los aceros y sus aleaciones.

En el presente documento se busca aumentar la dureza de un acero cuya composición aún no está definida. En base a la bibliografía consultada existe tres formas de cambiar las propiedades mecánicas en los aceros y sus aleaciones y estas son: Endurecimiento por acritud, solución sólida, tratamientos térmicos.

2.5.1. *Acritud (endurecimiento por trabajo en frío).*

La deformación en frío como laminado, estriado, etc. permite el endurecimiento de los aceros debido a que el 90 por ciento de la energía aplicada se disipa como calor y el resto se almacena en la red cristalina aumentando la energía interna entre 0,01 a 1,0 calorías/gramo, esto dependerá del punto de fusión o del contenido de aleación del material, en general la dureza y el límite elástico aumentan por la deformación en frío, este efecto de endurecimiento aumenta la reactividad química; es decir, aumenta velocidad de corrosión, estos efectos nocivos se pueden eliminar con un recocido de recristalización. (SANCHEZ, y otros, 2015) En la Figura 12-2a se observa que sucede con la microestructura del acero cuando este se somete a deformación en frío y en la Figura 12-2b como se engrosan los granos con el recocido posterior a la deformación en frío.

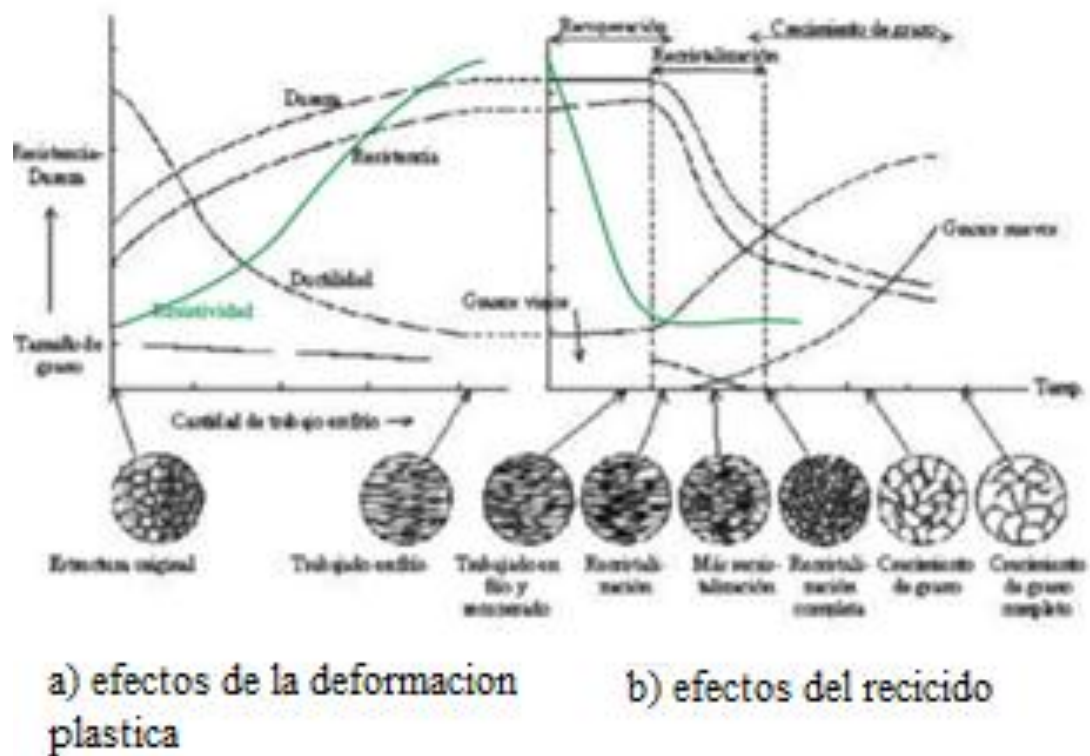


Figura 12-2: Modificación de las propiedades durante la deformación y el recocido posterior

Fuente: (SANCHEZ, y otros, 2015)

2.5.2. Solución sólida (química).

Una de las maneras de aumentar la dureza así como otras características de los metales es trabajar en sí en la composición química misma del acero; es decir, utilizar solutos (elementos aleantes) que les den mejores propiedades al acero, esto no es tan sencillo ya que se debe investigar y analizarlos porcentajes adecuados de soluto.

En la Figura 13-2 Se puede observar los diferentes efectos de elementos aleantes sobre el límite elástico convencional (1%) para cobre policristalino a temperatura ambiente. (SANCHEZ, y otros, 2015)

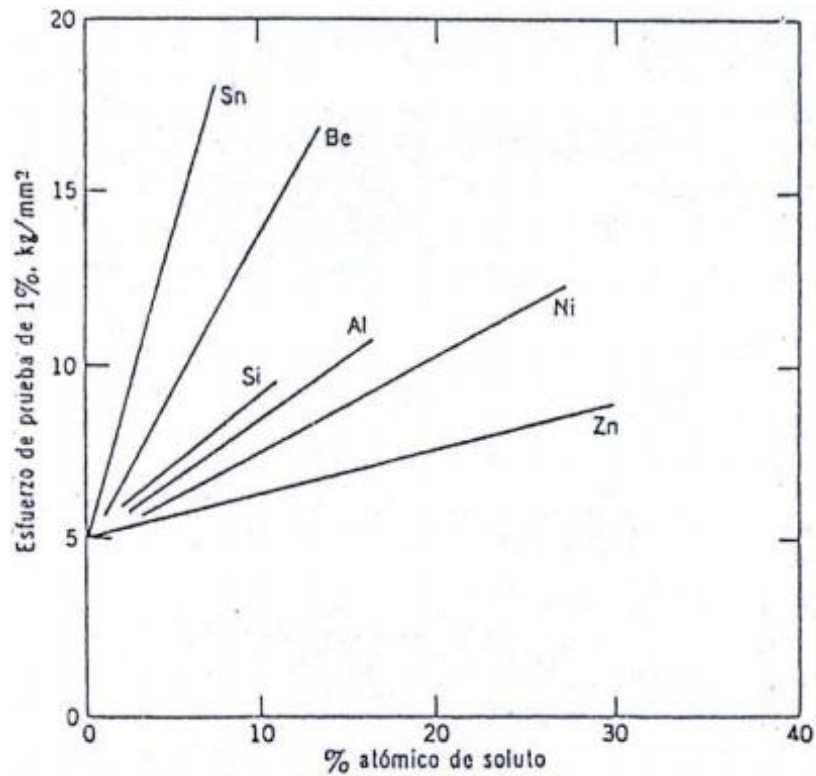


Figura 13-2: Efectos de los elementos aleantes.

Fuente: (SANCHEZ, y otros, 2015)

2.5.3. *Tratamientos térmicos.*

El cambio de propiedades de un material con calentamiento y enfriamiento controlados se denomina *tratamiento térmico*. Como primer paso para entender los principios básicos de los tratamientos térmicos se debe entender el diagrama Hierro- Carbono. (PEREZ PATIÑO, 1996). En la figura 14-2. Se muestra el Diagrama Hierro-Carbono y las fases que se producen en el enfriamiento.

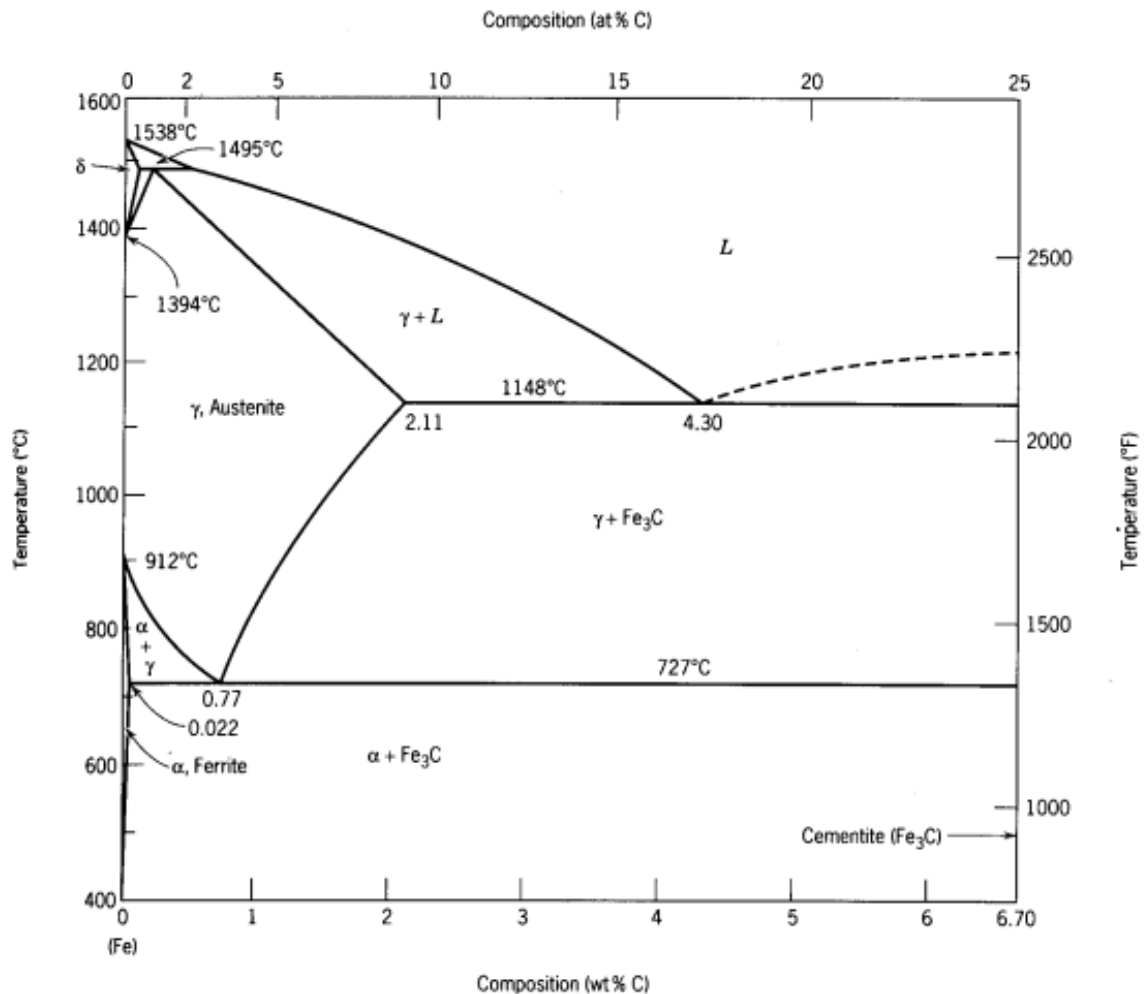


Figura 14-2: Diagrama hierro carbono reducido

Fuente: (SMITH, y otros, 2004)

El diagrama hierro carbono se toma como guía para realizar tratamientos térmicos a los aceros ya que los aceros tienen otros elementos aleantes además del carbono, estos elementos modifican las líneas de transformación de dicho diagrama, por esta razón el diagrama hierro carbono nos da una idea del comportamiento y las transformaciones que sufre la microestructura de los aceros en un enfriamiento, este fenómeno sucede ya que el hierro es un metal alotrópico³ con respecto a la temperatura.

El término tratamiento térmico se lo utiliza de manera general ya que este abarca métodos de ablandamiento y de endurecimiento, dentro de los métodos de endurecimiento tenemos el templeado (temple y revenido) y los tratamientos superficiales (Nitruración, Carburación, Cianuración, etc.).

³ Un mismo elemento se puede presentar con estructuras moleculares diferentes.

2.5.3.1. *Temple o endurecimiento del acero.*

Al procedimiento de calentar un acero a una temperatura elevada y luego ser enfriado rápidamente se lo conoce con el nombre de temple o templado.

El contenido de carbono está ligado directamente a que un acero pueda aumentar su dureza por medio del temple, pero posterior al temple es necesario someter a los aceros a una temperatura de revenido con el fin de aliviar las tensiones que genera el enfriamiento brusco.

2.5.3.2. *Velocidad de calentamiento y de enfriamiento.*

La velocidad de calentamiento así como la de enfriamiento son factores importantes que afectaran directamente al temple o a cualquier tratamiento térmico.

El calor fluye del exterior al interior del acero a una velocidad determinada, si el acero se calienta demasiado rápido no se obtendrá una estructura uniforme, en caso que la pieza a templar sea irregular lo más recomendable es una velocidad de calentamiento lenta, mientras mayor sea la sección mayor será la tiempo de calentamiento, después de alcanzar una temperatura de calentamiento adecuada es necesario mantener a la pieza por un tiempo a dicha temperatura para obtener resultados uniformes. (PEREZ PATIÑO, 1996)

En conclusión la dureza dependerá de tres parámetros tamaño de la pieza, contenido de carbono y velocidad de temple.

2.5.3.3. *Microestructura de un acero templado.*

- *Austenita*: Es el nombre que se le da a la solución sólida gamma γ . La austenita tiene una estructura cristalina FCC⁴, la solubilidad del carbono en la austenita alcanza un máximo de 2,08 por ciento a 1.148°C y disminuye a 0,8 por ciento a 723°C. (SMITH, y otros, 2004)

⁴ Face Center Cubic o Cúbica centrada en el cuerpo

- *Ferrita*: Es una solución sólida de hierro BCC⁵, tiene una solubilidad sólida máxima de 0.002% de carbono a una temperatura de 727°C, la ferrita delta es únicamente estable a temperaturas elevadas y no tiene un significado práctico en ingeniería. (KALPAKJIAN, y otros, 2002)
- *Perlita*: la microestructura que se forma por láminas de ferrita y cementita se la conoce con el nombre de perlita, y aparece en granos denominados “colonias”; dentro de cada colonia las capas están orientadas en la misma dirección y esta dirección varía de una colonia a otra. (CALLISTER Jr.)
- *Martencita*: es la morfología más dura que se puede producir debido a la velocidad de enfriamiento de la austenita.

2.5.3.4. Elementos de aleación del acero.

Según la AISI y la SAE los aceros aleados se clasifican por medio de dígitos en donde el primer dígito indica el elemento de aleación, el segundo dígito el porcentaje del elemento de aleación y los dos últimos dígitos el porcentaje de carbono, la única diferencia es que la AISI además de los cuatro dígitos tiene una letra que indica el método de fabricación del acero. (PUENTE SANCHEZ, 1981)

Según el tratamiento térmico los elementos de aleación se pueden encontrar: disueltos en la ferrita, formando carburos, en forma de inclusiones no metálicas y como elementos simples.

⁵ Body Center Cubic o Cúbica centrada en el cuerpo.

Disueltos en la ferrita	Tendencia a disolverse en la ferrita o formar carburos	Combinados en forma de carburos	Formando inclusiones no metálicas	En forma de elementos simples
Níquel	→			
Silicio	→		Silicio	
Aluminio	→		Aluminio	
Cobre	→			Cobre
Cobalto	→			
Manganeso	→	← Manganeso	Manganeso	
Cromo	→	← Cromo	Cromo	
Tungsteno	→	← Tungsteno		
Molibdeno	→	← Molibdeno		
Vanadio	→	← Vanadio	Vanadio	
Titanio	→	← Titanio	Titanio	
Fósforo	→			
Azufre			Azufre	
Plomo				Plomo

Figura 15-2: Tendencia de los elementos aleantes en el acero
Fuente: (PUENTE SANCHEZ, 1981)

En la Figura 15-2 se puede observar la tendencia que tienen cada uno de los elementos de aleación, es decir algunos de ellos como el níquel, silicio, aluminio, cobre, cobalto tienden a disolverse en la ferrita; mientras que otros elementos forman carburos al mezclarse con el carbono. Los elementos formadores de carburos como el manganeso, vanadio, molibdeno, titanio, tungsteno aumentan la dureza en los aceros.

2.5.3.5. Templabilidad de los elementos de aleación:

Los elementos de aleación mejoran la templabilidad de los aceros esto quiere decir que nos permite temprar especímenes de gran espesor así como también formas irregulares, este aspecto no se puede lograr en los aceros al carbono.

Un acero de alta templabilidad es aquel que endurece no solo en la superficie sino también en su interior; es decir, la templabilidad es una medida de la profundidad a la cual una aleación específica puede endurecerse. (CALLISTER Jr.)

CAPÍTULO III

3. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE EXPERIMENTACIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo identificar el procedimiento para la selección de los parámetros, lo mismos que se emplearon para aumentarla resistencia al desgaste de las placas utilizadas en los molinos de minería. Empezando con: el ensayo de espectrometría, procedimiento para la preparación metalografía, caracterización del material, desarrollo de especificaciones para tratamientos térmicos en aceros, ensayos de dureza, desarrollo de las especificaciones para pruebas de desgaste. El diagrama de la Figura 1-3 muestra el procedimiento para el desarrollo de la presente investigación.

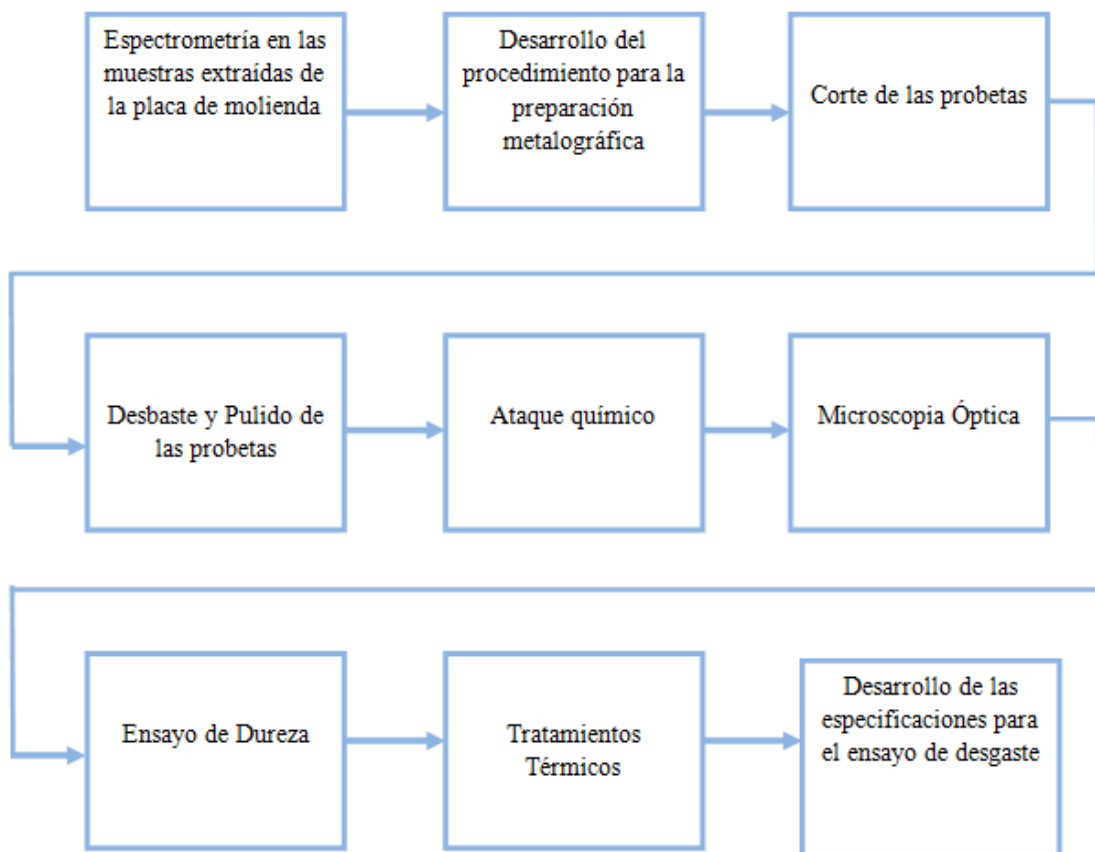


Figura 1-3: Diagrama del procedimiento para el desarrollo de la investigación

Fuente: Autor

3.1. Espectrometría aplicada en una probeta extraída de las placas motivo de estudio.

Dado a la nula disponibilidad de laboratorios y equipos con la que cuentan las pequeñas y medianas industrias mineras del país es necesario realizar un ensayo de espectrometría sobre la probeta extraída de las placas de molienda con el fin de establecer la composición química del material y en base a esto poder continuar con la investigación, empleado el espectrómetro de emisión óptica por chispa marca BRUKER ION, el cual se observa en la Figura 2-3.

Para el ensayo de espectrometría se considera las especificaciones de la Norma ASTM E415-17.



Figura 2-3: Equipo para ensayos de espectrometría.

Fuente: Autor

El tamaño de la muestra recomendado por la Norma ASTM E 415 es de 10mm a 38mm estas dimensiones pueden variar dependiendo de la disponibilidad del material, disposiciones necesarias de dimensiones establecidas para ensayos posteriores, etc.

La preparación de la superficie de la muestra consiste en lijar la superficie comenzando con una lija de grit 50, 80 hasta un máximo de 120.

Se tomaran dos huellas de carbono, las misma que deben tener un color gris oscuro esto indica que la huella de carbono es correcta.

3.2. Desarrollo del procedimiento para la preparación metalográfica.

- Alcance.- La metalografía es el nombre con el que se conoce a la técnica mediante la cual se puede observar las características de la microestructura de los metales como: fases, morfología, inclusiones, tamaño de grano, etc. todo con

la ayuda de un microscopio óptico.

Las muestras para el ensayo metalográfico fueron extraídas de una placa trituradora utilizada en el molino para minería, el procedimiento que se establece se basa en las especificaciones “*ASTM E3-95 Standar Practice for Preparation of Metallographic Spesimennts*”, el mismo que se desarrolla a continuación.

3.2.1. *Corte.*

Las recomendaciones según las especificaciones de la ASTM E3 establece que el tamaño de la probeta no debe ser mayor a una pulgada, pero por motivos de ensayos y pruebas mecánicas, el tamaño de las probetas son: ancho una pulgada, largo tres pulgadas y un espesor de media pulgada. El corte se realizará de manera cuidadosa ya que se debe evitar en lo posible que dicha acción produzca algún cambio en la microestructura del metal debido a temperaturas elevadas de corte, se utilizará una máquina de corte en frío, ya que las características de funcionamiento cumplen con las especificaciones establecidas.

3.2.2. *Desbaste y Pulido.*

- *Desbaste:* En primera instancia del desbaste muchas de las veces es necesario utilizar un esmeril con el fin de regularizar la superficie de la muestra para luego proseguir con el proceso de lijado.



Figura 3-3: Esmeril

Fuente: Autor

El desbaste de las muestras a analizar se debe realizar mediante lijas, las mismas que son cambiadas progresivamente comenzando desde una lija de grit 100, 240, 320, 400, 600, 1000, 1500, 2000.

El procedimiento consiste en friccionar la muestra sobre la lija que se encuentra sujeta a un porta lijas, los movimientos deben ser de arriba hacia abajo en una sola dirección una vez que se obtiene rasgaduras unidireccionales se debe girar la muestra 90° repetir el procedimiento para luego cambiar de lija a una de mayor granulometría hasta llegar sucesivamente al grit 2000.



Figura 4-3: Procedimiento de desbaste

Fuente: Autor

- *Pulido:* El paso a seguir es pulir la superficie anteriormente lijada para ello se utilizara un disco de paño de tela sobre la cual se vierte óxido de alúmina hasta lograr una superficie completamente lisa y un acabado tipo espejo. En la Figura 20 se muestra el equipo que se utilizara para llevar a cabo este procedimiento el mismo tiene un disco giratorio sobre el cual se coloca paño de gamuza.



Figura 5-3: Pulidora de disco

Fuente: Autor

3.3. Ataque químico.

Una vez que la probeta esta pulida y bien seca se realiza el ataque químico el mismo que

revelará la microestructura del acero, el ataque químico dependerá del tipo de acero con el que se esté trabajando, los diferentes tipos de ataque se muestra en las especificaciones “*ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*”. El ataque químico para aleaciones de Hierro Carbono se adjuntan en el Anexo A

Dependiendo del tipo de acero o la semejanza que se presenten entre ellos se establecen a continuación posibles reactivos para la realización del ataque químico.

Tabla 1-3: Ataque químico para aleaciones ferrosas.

Metal	Reactivo	Composición
Aleaciones Ferrosas	Nital	1_5 mL HNO_3 100 mL etanol (95%) o metanol (95%)

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Utilizando un gotero dejar caer unas gotas del reactivo sobre el metal y dejar actuar más o menos por 10 segundos, para detener el ataque se utiliza alcohol.

Una vez detenido el ataque se quita el alcohol con agua y para secar la muestra se utiliza un compresor, de esta manera se eliminara todo rastro de agua sin necesidad de topar la superficie de la muestra que esta lista para llevarla al microscopio óptico.

3.4. Microscopia óptica.

Con la ayuda del microscopio metalográfico se revisará la microestructura de las probetas preparadas con anterioridad, este equipo cuenta con una variedad de lentes objetivos que van desde 100x hasta los 500x.



Figura 6-3: Microscopio Óptico

Fuente: Autor

3.5. Ensayo de Dureza.

Se realizará ensayos de durezas Brinell y en sayos de dureza Rockwell según se requiera en las probetas antes y después de ser sometidas a tratamientos térmicos.

3.5.1. Dureza Brinell.

Los ensayos de durezas Brinell se llevará a cabo bajo la especificación de la Norma ASTM E10 “*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*”

- *Preparación de la superficie.* - se debe tomar en cuenta que para llevar a cabo el ensayo de dureza Brinell, las superficies deben ser totalmente paralelas, además que la superficie de indentación en lo posible debe estar pulida de esta manera se garantizará los resultados del ensayo.
- *Equipo.* - para medir la dureza de las probetas se utilizará el durómetro modelo HBRV-187.5, el mismo que presenta algunas características para medir todas las durezas es decir Vickers, Brinell y Rockwell con tan solo modificar la carga y cambiar de indentador.



Figura 7-3: Durómetro

Fuente: Autor

La dureza Brinell no es una medida directa, motivo por el cual se debe medir el diámetro de la huella de indentación con la ayuda de un microscopio con micrómetro.



Figura 8-3: Microscopio con micrómetro
Fuente: Autor

Luego estos valores se reemplazarán en la ecuación tomada de la norma ASTM E10 de este modo se obtendrá la dureza Brinell correspondiente a esa huella.

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right) \quad (1)$$

Donde:

P: Carga aplicada (kg)

d: diámetro de la huella (mm)

D: diámetro del indentador (mm)

3.5.2. Dureza Rockwell.

Los ensayos de dureza Rockwell se llevarán a cabo bajo las especificaciones de la Norma ASTM E18_17e1 “*Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*”

- *Preparación de la superficie.*- se debe tomar en cuenta que para llevar a cabo la superficies deben ser totalmente paralelas de esta manera se garantiza los resultados del ensayo.

- *Equipo.*- para medir la dureza Rockwell se utiliza el mismo equipo mostrado en la Figura 7-3. con la diferencia que el valor de dureza es una medida directa.

Por motivos de comparación de resultados se utilizará una tabla de conversión de durezas. La misma que se adjunta en el Anexo B

Tabla 2-3: Conversión de dureza estándar para metales según la norma ASTM E140-02

Vickers Hardness Number	Brinell Hardness Number	Rockwell Hardness Number
		C Scale
Vickers Indenter 1, 5, 30,kgf (HV)	10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	150-kgf 1/16-in. (1.588-mm)Ball (HRC)
326	313	34.0
309	298	32.0
285	275	28.5 ^a
266	258	25.5
248	241	22.5
234	228	20.0
220	215	17.0
209	204	14.5
198	194	12.0
188	184	9.0
179	176	6.5
171	168	4.0
164	161	2.0

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASTM Commite on Standars, 2002)

3.6. Tratamiento térmico.

Se someterá a las muestras a varios tratamientos térmicos los mismos que se realizaran de acuerdo a la cantidad de carbono presente en la composición química de la probeta, para establecer la temperatura más idónea de tratamientos térmicos como: Normalizado, Recocido y Temple se considera las recomendaciones de la Norma ASTM A255-02 “*Standard test Methods for Determining hardenability of Steel*”

Tabla 3-3: Temperaturas recomendadas de acuerdo al contenido de carbono según la Norma ASTM A255-02 “*Normalizing and Austenitizing Temperature*”

Steel Series	Ordered Carbon Content, max, %	Normalizing Temperature, °F (°C)	Austenitizing Temperature, °F (°C)
1000, 1300, 1500 3100, 4000, 4100	0,25 and under	1700 (925)	1700 (925)
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 8800	0.26 to 0.36, ind	1650 (900)	1600 (870)
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.37 and over 0.25 and under	1600 (870) 1700 (925)	1550 (845) 1550 (845)
9200	0.26 to 0.36, ind 0.37 and over 0.50 and over	1650 (900) 1600 (870) 1650 (900)	1500 (815) 1475 (800) 1600 (870)

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASTM Committee on Standards, 2002)

3.7. Desarrollo de las especificaciones para el ensayo de desgaste.

Los ensayos de desgaste de las muestras se realizaran de acuerdo a las especificaciones de la Norma ASTM G65-04 “*Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand / Rubber Wheel Apparatus*”.

Según la norma ASTM G65 el ensayo de desgaste es la pérdida de masa que se produce debido a la fricción entre el disco y la superficie de desgaste de la probeta por medio de la interacción del material abrasivo que cae tangencialmente entre estos dos elementos produciendo una huella.

3.7.1. Cálculo del volumen perdido

El desgaste producido se medirá como el volumen perdido (mm^3), es una medición indirecta para la cual existen varios métodos de medición como: pérdida de masa, medición lineal o del área de desgaste, en caso que la sección sea irregular se empleara el cálculo del volumen perdido directamente.

Con el fin de establecer el volumen perdido utilizaremos la medición del desgaste por medio de pérdida de masa debido a que con este método los valores se determinan de

forma cuantitativa y es muy confiable.

Se debe pesar las muestras antes y después del ensayo de desgaste, con la variación de pesos se establece la diferencia de masa, este valor de masa se introduce en la ecuación (2) mediante la cual obtendremos el volumen perdido.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

Donde:

V = volumen perdido (mm^3)

m= masa perdida (gr)

ρ = densidad del material

3.7.2. *Material abrasivo.*

Como material abrasivo se utiliza arena de prueba la cual deberá contar con características especificadas en la Norma ASTM G65 como tamaño de grano y humedad relativa. A continuación, se muestra una tabla con el diferente tamaño de grano de los materiales abrasivos.

Tabla 4-3: Medidas de granos para discos de desbaste y otros abrasivos

	Macrogrits		Microgrits
Designación	Diámetro en μm	Designación	Diámetro en μm
F10	2085	F230	53
F20	1040	F240	44.5
F30	625	F280	36.5
F40	438	F320	29.2
F54	310	F360	22.8
F60	260	F400	17.3
F70	218	F500	12.8
F80	185	F600	9.3
F90	154	F800	6.5
F100	129	F1000	4.5
F120	109	F1200	3
F150	82	F1500	2
F180	69	F2000	1.2

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (CALERO CALERO, y otros, 2015)

3.7.3. Estandarización de la muestras.

El tamaño de las probetas debe ser estrictamente de acuerdo con las especificaciones de la ASTM G65, de esta manera se garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos en el ensayo.

Tabla 5-3: Dimensiones estandarizadas según la Norma ASTM G65

Acero	Unidades	
	In	mm
Largo	3	76
Ancho	1	25
Espesor	0,5	12,7

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASTM Committee on Standards, 2004)

3.7.4. Tipos de ensayos

La Norma recomienda cinco procedimientos los mismos que se aplican de acuerdo al grado de resistencia al desgaste que presente la muestra a ensayar. Estos procedimientos son:

– Procedimiento A.

Es una pérdida relativamente severa que clasifica los materiales metálicos en una escala de pérdida de volumen a la abrasión extrema. Es particularmente útil en la clasificación de los materiales de media resistencia a la abrasión extrema. (CALERO CALERO, y otros, 2015)

– Procedimiento B.

Es una variación a corto plazo del procedimiento A. Se puede utilizar para materiales resistentes altamente abrasivos, pero es particularmente útil en la clasificación a los materiales resistentes a la abrasión media y baja. El procedimiento B puede utilizarse cuando el volumen de pérdida del procedimiento A supere 100mm^3 . (CALERO CALERO, y otros, 2015)

– *Procedimiento C.*

Es una variación a corto plazo del procedimiento A en revestimientos delgados.

– *Procedimiento D.*

Es una variación del procedimiento A, que es particularmente útil en la clasificación de metales de baja resistencia a la abrasión. También se utiliza en materiales de clasificación de un tipo o de materiales que serían muy cerca en las tasas de pérdida de volumen como el desarrollado por el procedimiento A. (CALERO CALERO, y otros, 2015)

– *Procedimiento E.*

Es una variación a corto plazo del procedimiento B, que es útil en la clasificación de los materiales con resistencia a la abrasión media o baja.

Tabla 6-3: Parámetros de ensayos según la norma ASTM G65

Parámetros de Ensayo							
Procedimiento	Carga		Tiempo	Rotación del disco		Abrasion lineal	
	N	Lb	Min	RPM	Total Rev.	M	Ft
A	130	30	30	200	6000	4309	14138
B	130	30	10	200	2000	1436	4711
C	130	30	0,5	200	100	71,8	236
D	45	10,1	30	200	6000	4309	14138
E	130	30	5	200	1000	718	2360

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASTM Committee on Standards, 2004)

La guía de laboratorio para el ensayo de abrasión de acero se adjunta en el Anexo L, al igual que la ficha de reporte del ensayo de acero se adjunta en el Anexo M.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.

El presente capítulo tiene como fundamento principal el desarrollo y ejecución de los ensayos y procedimientos definidos según el orden y metodología establecidos en el capítulo anterior, de modo que al finalizar los procedimientos descritos sea posible su cuantificación y posterior evaluación. El análisis y síntesis del fundamento teórico tiene relación intrínseca con el conocimiento empírico en base a pruebas experimentales, dichos conocimientos son necesarios para la comprensión de los ensayos durante su desarrollo que son la parte esencial del trabajo de investigación.

4.1. Obtención de muestras de la placa de acero

La obtención de las muestras de la placa de acero se realizó mediante el corte en frío por arranque de viruta con máquinas de control tipo manual. Las dimensiones de las muestras se basan según requerimientos establecidos en la norma técnica ASTM G65, dichas dimensiones se especifican o detallan en el capítulo anterior en lo referente a dimensiones de muestras a ensayar.

4.1.1. Procedimiento de corte

El material fue extraído de las placas de un molino de construcción tipo artesanal utilizado en minería, de estos elementos se toma dos muestras. La primera que indica la severidad de desgaste que ha sufrido la placa; y la segunda antes de iniciar el trabajo, la misma fue seccionada mediante oxicorte, de ésta se tomarán las muestras para el desarrollo del presente trabajo, debido a la naturaleza del corte el material tiende a variar su microestructura por consiguiente a las nuevas secciones se les realiza un corte en frío para obtener las dimensiones definitivas y un acabado superficial adecuado sin modificar su microestructura.



Figura 1-4: Placas del molino de construcción tipo manual utilizado para minería

Fuente: Autor

Resultados

Finalizado el proceso de corte al que fue sometida la placa descrito en el literal anterior, se obtuvieron veintiséis muestras para la realización del ensayo de desgaste, se utilizarán cuatro muestras de cada proceso, esto se debe a las diferencias dentro de las propiedades mecánicas que presentan durante el desarrollo de los tratamientos térmicos bajo los cuales se fundamenta la presente investigación.



Figura 2-4: Muestras sometidas a corte bajo especificación ASTM G65

Fuente: Autor

4.1.2. Ensayo de Espectrometría aplicado en muestras tomadas de la placa de acero para conocer su composición química.

El ensayo de espectrometría se realizó en base al desarrollo del análisis bibliográfico, de acuerdo al apartado de ensayos de espectrometría descrito en el capítulo anterior, se aplica para conocer de manera precisa los porcentajes de los elementos presentes en la

composición química de las muestras tomadas de la placa de acero (elementos molidores de un molino utilizado en minería), de modo que se puede establecer el tipo de acero o un rango de familias, dentro del cual se puede clasificar. El espectrómetro que se utilizó para la realización del ensayo es de tipo BRUKER ION, el cual se encuentra en las instalaciones de la Facultad de Mecánica en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH.

Procedimiento de Ensayo de espectrometría según la Norma ASTM E 415-14.

Para la realización del ensayo de espectrometría se debe tener en cuenta el marcado de la huella de carbono puesto que puede presentar diferentes detalles sujetos a análisis y decisión en la toma de datos final; es decir la principal característica de una marca de huella radica en su pigmentación la misma que debe presentar una tonalidad gris oscuro, el cual indica que la huella presenta un buen marcado y además los datos obtenidos serán de mejor precisión. Otro aspecto importante a considerar es el número de marcado de huellas que se deben realizar para la obtención de datos, las especificaciones de la norma ASTM E415-14 recomienda un marcado mínimo o ideal de dos huellas en diferentes zonas de la muestra, la superficie de la muestra no debe presentar porosidades y de eso modo se evita posibles errores en la obtención de los datos.

Tabla 1-4: Procedimiento del Ensayo de Espectrometría aplicado en las muestras.


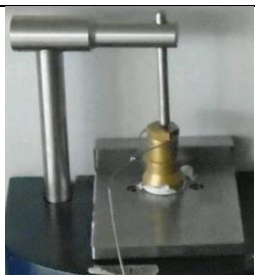


Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
Antes de iniciar el Ensayo de Espectrometría: Condición superficial de la muestra				
1	Preparación de la superficie de la muestra bajo las especificaciones de la Norma ASTM E 415 - 17	Muestra tomada de la placa de acero, estado de suministro.	30-40 min	
2	Desbaste de la muestra mediante un disco de esmeril para obtener la superficie requerida en espectrometría (libre de posibles porosidades).	Disco de esmeril Máquina pulidora	5-10 min	

Tabla 2-4: (Continua) Procedimiento del Ensayo de Espectrometría aplicado en las muestras.

3	Limpieza y secado de la muestra.	Algodón, compresor.	5-10 min	
Antes de iniciar el Ensayo de Espectrometría: Condiciones iniciales del Espectrómetro				
1	Presión de trabajo del espectrómetro: 3 bar, esperar que la presión se estabilice	Tanques contenedores de gas (Argón)	10-30 min	
2	Verificación del estado del marcador de huella, se realiza una limpieza en caso de ser necesario.	Marcador de huella y accesorios de limpieza (Espectrómetro tipo BRUKER ION)	5-10 min	
3	Puesta en marcha del espectrómetro	Espectrómetro tipo BRUKER ION	5 -10 min aprox.	
Después el Ensayo de Espectrometría				
4	Toma de datos de la composición química de la muestra. (Se realizan tres marcas de huella en zonas diferentes para la toma de datos)	Espectrómetro: BRUKER Muestra preparada	10-20 min	

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Resultados

Al finalizar el proceso de espectrometría, se determinó la composición química presente en la muestra en base a la toma de datos adquiridos mediante la marca de huella de carbono, se debe recalcar que los resultados obtenidos provienen de la tercera huella de carbono marcada, debido a que cumplía con las características de tonalidad gris oscuro establecidas en la Norma ASTM E415.

En el caso de la primera huella de carbono al terminar el ensayo, la marca no presento la pigmentación sugerida, motivo por el cual fue descartada considerando que el equipo aun no alcanzaba las condiciones necesarias para la realización de la toma de datos.

La segunda marca de huella de carbono cumplió con las características de tonalidad establecidas, pero por recomendaciones de Norma se realizó el tercer marcado del cual se extrajeron los datos.

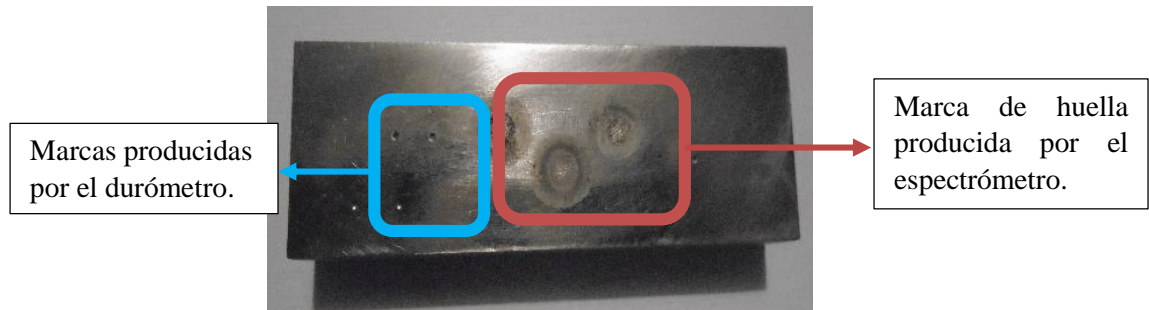


Figura 3-4: Muestra 1, finalizado el ensayo de espectrometría
Fuente: Autor

Tabla 3-4: Detalle de composición química presente en la muestra de la placa de acero.

BRUKER Analysis Report						
Elemento	Carbono	Silicio	Manganeso	Fósforo	Asufre	Cromo
Simbología	(C)	(Si)	(Mn)	(P)	(S)	(Cr)
Porcentaje (%)	0,700	0,267	13,30	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Elemento	Molibdeno	Níquel	Cobre	Aluminio	Cobalto	Magnesio
Simbología	(Mo)	(Ni)	(Cu)	(Al)	(Co)	(Mg)
Porcentaje (%)	0,065	0,119	0,064	0,0098	0,013	0,018
Elemento	Niobio	Titanio	Vanadio	Wolframio	Hierro	
Simbología	(Nb)	(Ti)	(V)	(W)	(Fe)	
Porcentaje (%)	0,0062	<0,0030	0,022	<0,100	85,34	

Realizado por: Lorena Córdova
Fuente: Autor

Aleaciones de aceros con alto contenido de manganeso.

Las aleaciones de acero con alto contenido de manganeso utilizados generalmente en herramientas que serán sometidas a grandes esfuerzos de desgaste, son conocidos también como acero tipo Hadfield, se presentan algunos tipos de aleaciones debido a su composición química esto según *Standard Specification for Steel Castings, Austenitic*

Manganese bajo la norma ASTM A 128/A 128M como se indica a continuación:

Tabla 4-4: Aceros Austeníticos fundidos según la norma ASTM A128

Requerimientos Químicos							
Grado	Composición (%)						
	Carbono	Manganeso	Cromo	Molibdeno	Níquel	Silicio	Fósforo
A	1,05-1,35	11,0 mín	---	---	---	1,00 máx	0,07 máx
B-1	0,9-1,05	11,5-14,0	---	---	---	1,00 máx	0,07 máx
B-2	1,05-1,2	11,5-14,0	---	---	---	1,00 máx	0,07 máx
B-3	1,12-1,28	11,5-14,0	---	---	---	1,00 máx	0,07 máx
B-4	1,2-1,35	11,5-14,0	---	---	---	1,00 máx	0,07 máx
C	1,05-1,35	11,5-14,0	1,5-2,5	---	---	1,00 máx	0,07 máx
D	0,7-1,3	11,5-14,0	---	---	3,0-4,0	1,00 máx	0,07 máx
E-1	0,7-1,3	11,5-14,0	---	0,9-1,2	---	1,00 máx	0,07 máx
E-2	1,05-1,45	11,5-14,0	---	1,8-2,1	---	1,00 máx	0,07 máx
F (J91340)	1,05-1,35	6,0-8,0	---	0,9-1,2	---	1,00 máx	0,07 máx

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASM International Committee, 1995)

Además se debe considerar a la norma ASTM 128/A 128M como un parámetro o lineamientos base a seguir; es decir, dentro del desarrollo de la industria se pueden presentar variaciones en la composición química y sus elementos aleantes y por ende de las propiedades mecánicas de este tipo de acero, así pues según especificación de fabricante ALRO un acero con alto contenido de manganeso puede presentar las siguientes características:

Tabla 5-4: Aceros con alto contenido de manganeso. Composición química

Contenido de manganeso entre 11-14%.					
Elemento	Carbono	Fósforo	Silicio	Azufre	Manganeso
Simbología	(C)	(P)	(Si)	(S)	(Mn)
Porcentaje (%)	1,200	0,020	0,015	0,020	11,00-14,00

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ALRO)

4.1.3. Ensayo de tratamientos térmicos y ensayo de dureza aplicado en muestras tomadas de una placa de acero (elementos moledores de un molino).

Se estableció realizar el tratamiento térmico seguido por ensayo de dureza, debido a que el objetivo del trabajo es aumentar la resistencia al desgaste y se debe considerar que la dureza está relacionada directamente con el desgaste de los materiales.

A continuación se detalla los procedimientos para cada uno de los ensayos a realizarse en este literal.

4.1.3.1. Procedimiento del ensayo de tratamiento térmico.

Con la determinación de la composición química de la muestra tomada de una placa de acero (elementos moledores de un equipo de molino utilizado en minería), se establece la temperatura y tiempos necesarios para la realización del ensayo de tratamientos térmicos, en este caso de estudio se consideró como elemento principal al contenido de carbono y en base a dicho contenido se estableció la temperatura de austenización de 925°C con un tiempo de permanencia a esta temperatura de 30min.

El manganeso fue considerado como un elemento secundario, aunque el porcentaje de manganeso sea superior al porcentaje de carbono en esta aleación. La temperatura de revenido fue de 705°C con un tiempo de mantención a esta temperatura de 45min estos datos se establecieron en base al contenido de manganeso de acuerdo a la investigación realizada por el Grupo de Investigaciones en Materiales, Avanzados Universidad Tecnológica de Pereira (HIGUERA, y otros, 2007)

Tabla 6-4: Procedimiento de ensayo para tratamientos térmicos.


Tratamientos térmicos				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
Condiciones iniciales de las muestras				
1	Dimensiones de las muestras según norma ASTM G65	Acero al manganeso	5 min	

Tabla 7-4: (Continua) Procedimiento de ensayo para tratamientos térmicos.


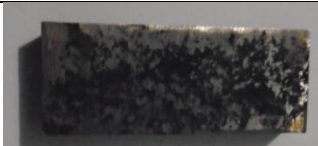






Ensayo de tratamientos térmicos				
2	Verificar las conexiones eléctricas y encender el equipo.	Mufla	1-5 min	
3	Colocar las muestras a ensayar	Probetas de acero al manganeso	5 min aprox.	
4	Establecer la temperatura de calentamiento de la mufla: T=925°C	Mufla	180 min aprox.	
5	Cuando la mufla alcanza la temperatura indicada, se cronometra el tiempo, y dependiendo del tipo de ensayo se retiran las muestras.	Cronómetro	30 min	
Tiempos requeridos para la realización de los diferentes ensayos y tratamientos térmicos.				
6	Recocido: cuando la mufla alcance la temperatura de 925°C, dejar transcurrir un corto periodo de tiempo y apagar el equipo. La muestra se enfría a temperatura ambiente dentro del horno.	Muestra a recocer	Tiempo de enfriamiento: 1 día aprox.	
7	Temple: cuando la mufla indique que se alcanzó la temperatura de 925°C, se deja por un corto periodo de tiempo y se enfría en agua o aceite dependiendo del tipo de temple que se esté realizando.	Muestras: para temple en agua y aceite	Tiempo de temple: 30-35 min Tiempo de enfriamiento: 45 seg aprox.	

Tabla 8-4: (Continua) Procedimiento de ensayo para tratamientos térmicos.

8	Normalizado: una vez que se indique que la temperatura es de 925°C en la mufla, dejar transcurrir un corto periodo de tiempo y realizar un enfriamiento en aire.	Muestra a normalizar	Tiempo de normalizado: 60 min	
7	Revenido: cuando la mufla alcance la temperatura establecida de 505°C, 705°C o 905 °C dependiendo del procedimiento que se esté realizando, dejar transcurrir un corto periodo de tiempo para luego apagar el equipo y dejar enfriar en el horno.	Muestras a revenir	Tiempo de Revenido: 45 min Tiempo de enfriamiento: 1 día aproximadamente	

Nota: La temperatura para los ensayos se estableció en base al contenido de carbono.

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor.

4.1.3.2. Procedimiento del ensayo de dureza Brinell y Rockwell.

Puesto que es necesario conocer alguna de las principales propiedades mecánicas de las muestras tomadas de las placas de acero del molino, se realizó el ensayo de dureza en las muestras en estado de suministro (ensayo base) y tratadas térmicamente, teniendo en consideración que la dureza se correlaciona con la resistencia al desgaste y otras características físicas de los materiales, los resultados obtenidos de este ensayo tienen como principal objetivo comprobar que las muestras que fueron sometidas a tratamientos térmicos cumplen con los parámetros de dureza necesarios para su posterior uso en el ensayo de desgaste; es decir, que la dureza sea mayor a la dureza del ensayo base (estado de suministro). Además del ensayo de dureza los datos obtenidos serán utilizados para un posterior análisis de resultados.

Para determinar la dureza en las muestras tanto en estado de suministro como tratadas térmicamente se utilizó dos tipos de procedimientos debido a la naturaleza del material del cual provienen las muestras (acero con alto contenido de manganeso – 13,65%Mn), las dos escalas son: dureza Rockwell bajo la norma ASTM E18-17 y dureza Brinell según la norma ASTM E10-01; puesto que la dureza es un propiedad importante del objeto de estudio y teniendo en cuenta la norma ASTM E140-02 “*Standard Hardness Conversion*

Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness and Scleroscope Hardness” o tablas de conversión de dureza estándar para metales, la dureza obtenida se puede establecer en un solo tipo de escala. Además las muestras que fueron utilizadas durante el ensayo de dureza deben cumplir el procedimiento de preparación de muestras según lo establece la norma ASTM E3-95.

Tabla 9-4: Procedimiento para el Ensayo de Dureza Brinell según norma ASTM E 10-02.






ASTM E 10. Ensayo de dureza Brinell				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
1	Verificar las conexiones eléctricas y encender el equipo	Conexiones eléctricas – durómetro	3 min aprox.	
2	Colocar el indentador recomendado para ensayos de dureza Brinell	Indentador: Bola de acero de 2,5 mm (según norma ASTM E10)	3 min aprox.	
3	Fijación de la carga a aplicarse : F=1 839 N	Durómetro	3 min aprox.	
4	Se coloca la muestra preparada según norma ASTM E3 en el equipo	Muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente,	3 min aprox.	
5	Aplicación de la carga sobre la muestra	Durómetro	10 seg.	

Tabla 10-4: (Continua) Procedimiento para el Ensayo de Dureza Brinell según norma ASTM E 10-02.

6	Retirar la carga aplicada en la muestra		5 min aprox.	
5	Medir el diámetro de huella.	Microscopio con micrómetro	5-10 min	

Realizado por: Lorea Córdova

Fuente: Autor

Tabla 11-4: Procedimiento para el Ensayo de Dureza Rockwell C según norma ASTM E18-17.




Ensayo de dureza Rockwell C* (ASTM E 18)				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
1	Verificar las conexiones eléctricas y encender el equipo.	Conexiones eléctricas – durómetro	3 min aprox.	
2	Colocar el indentador para ensayos de dureza Rockwell C.	Indentador de diamante (según norma ASTM E18)	5 min aprox.	
3	Fijación de la carga a aplicarse: $F = 1471 \text{ N}$.	Durómetro	1-3 min	
4	Se coloca la muestra preparada según norma ASTM E3 en el equipo.	Muestras tratadas térmicamente	1-3 min	
5	Aplicación de la carga sobre la muestra.	Durómetro	1 min aprox.	

Tabla 12-4: (Continua) Procedimiento para el Ensayo de Dureza Rockwell C según norma ASTM E18-17.

6	Al retirar la carga aplicada esperar que se estabilice la escala del durómetro.	Durómetro	5-10 min	
7	Observar y anotar el valor de dureza obtenido.			
*Nota: El durómetro para escala Rockwell C proporciona valores de dureza directamente.				

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Resultados.

Los tratamientos térmicos tienen como principal objetivo modificar las propiedades mecánicas de los materiales.

Con las mediciones de durezas tomadas de las muestras tratadas térmicamente se estableció si esta propiedad aumentó, disminuyó o se mantuvo con relación a los datos obtenidos en el ensayo uno (ensayo base). En el caso que la dureza aumente estas muestras serán sometidas a ensayos de desgaste.

A continuación se detalla los ensayos realizados, el tipo de tratamiento térmico y la dureza del material en cada uno de los caso.

- Ensayo base.

Es el primer ensayo o ensayo principal del cual se obtendrán características del material en estado de suministro. Los datos de dureza obtenidos de este ensayo servirán como base para la comparación con los resultados obtenidos en los ensayos posteriores a este.

Tabla 13-4: Detalles del ensayo base o ensayo 1. Muestras en estado de suministro y Recocido.

Número de ensayo: 1 (Ensayo Base)						
Parámetros	Tratamiento	Temperatura de mufla	Tiempo de permanencia en la mufla	Tipo de enfriamiento	Tiempo de enfriamiento	Comentarios
		°C	Min	-	Min	
Muestra 1	Estado de suministro	Sometida a ensayo de espectrometría.				-
Muestra 2	Estado de suministro	-	-	-	-	Ensayo base
Muestra 3	Recocido	925	120	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del Horno.	1440	Ensayo base
Nota: Considerar los tiempos de enfriamiento.						

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Detalles de los resultados de dureza obtenidos en las muestras del ensayo 1.

Principales características a considerar:

Tipo de ensayo: Dureza Brinell

Tratamiento: Estado de suministro

Carga (P): $P = 187,5 \text{ kgf}$ o $P = 1839 \text{ N}$

Identador: bola de acero extremadamente duro

Diámetro de identador (D): $D = 2,5 \text{ mm}$

Diámetro de huella (d): d

Ecuación para determinar dureza Brinell según ASTM E10

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}; P[\text{kgf}]$$



Figura 4-4: Muestra 2, en estado de suministro.

Fuente: Autor

Tabla 14-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 1, ensayo base

Numero de ensayo: 1					
Ensayo de dureza	Tratamiento térmico	Dureza Rockwell	Dureza Brinell		Comentarios
			Diámetro de huella	Dureza Brinell	
Simbología		HRC	D	HBW	
Ecuación		-	-	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Muestra 1	Estado de suministro	Sometida a ensayo de espectrometría			-
Muestra 2	Estado de suministro	16	1,05	206	Ensayo base
		14	1,07	198	
Muestra 3	Recocida (925°C)	18	1,03	215	Presenta mejora en la dureza respecto al ensayo base.
		20	1,01	224	
Nota: El ensayo realizado es únicamente dureza Brinell.					
La conversión de escalas de dureza se realizó según la norma ASTM E140.					

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

El denominado ensayo base establece los parámetros que se deben superar y están sujetos a comparación con los ensayos subsiguientes.

- *Ensayo 2*

En este ensayo se realizan varios tratamientos térmicos con el fin de establecer cambios morfológicos en la microestructura de las muestras, resultados que se mostraran más adelante con los ensayos metalográficos.

Tabla 15-4: Detalles del ensayo 2. Muestras sometidas a recocido, temple, normalizado, temple y revenido.

Número de ensayo: 2						
Parámetros	Tratamiento	Temperatura de mufla	Tiempo de permanencia en la mufla	Tipo de enfriamiento	Tiempo de enfriamiento	Comentarios
		°C	Min	-	Min	
Muestra 4	Recocido	925	120	Enfriamiento a temperatura ambiente en el horno.	-	-
Muestra 5	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-

Tabla 16-4: (Continua) Detalles del ensayo 2. Muestras sometidas a recocido, temple, normalizado, temple y revenido.

Muestra 6	Normalizado	925	60	Enfriamiento en aire	-	-
Muestra 7	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente en el horno.	-	-
<i>Nota: Datos que validarán el ensayo base.</i>						

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Detalles de los resultados de dureza obtenidos en las muestras del ensayo 2.

Principales características a considerar:

Tipo de ensayo: Dureza Brinell

Tratamiento: Recocido (925°C)

Carga (P): $P = 187,5 \text{ kgf}$ o $P = 1839 \text{ N}$

Identador: bola de acero extremadamente duro

Diámetro de identador (D): $D = 2,5 \text{ mm}$

Diámetro de huella (d): d

Ecuación para determinar dureza Brinell según ASTM E10

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}; P[\text{kgf}]$$

Tipo de ensayo: Dureza Rockwell C

Carga (P): $P = 150 \text{ kgf}$ o $P = 1471 \text{ N}$

Identador: cono de diamante.

El durómetro presenta de manera directa los valores de dureza en escala Rockwell C.



Figura 5-4: Muestra 4, Recocido a 925°C
Fuente: Autor

Tabla 17-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 2.

Número de ensayo: 2					
Ensayo de dureza	Tratamiento térmico	Dureza Rockwell	Dureza Brinell		Comentarios
			Diámetro de huella	Dureza Brinell	
Simbología		HRC	D	HB	
Ecuación		-	-	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Muestra 4	Recocido (925°C)	22	0,97	238	Respecto al ensayo base presenta una elevación de su dureza.
		21	1	228	
Muestra 5	Temple (925°C) en agua	18	1.03	215	Presenta similitud con la muestra 4 respecto a sus características.
		16	1.05	206	
Muestra 6	Normalizado (925°C)	16	1,05	206	Respecto al ensayo base presenta similitud.
		15	1,06	202	
Muestra 7	Temple a 925 °C (agua) y Revenido a 705°C	24	-	248	Presenta una considerable mejora en la dureza del 23 % con respecto al ensayo base.

Realizado por: Lorena Córdova
Fuente: Autor

Se puede observar en el Cuadro 4 la muestra 4 y la muestra 7 incrementaron la dureza con relación a la dureza obtenida de la muestra en estado de suministro.

- Ensayo 3

El ensayo 3 tenía por objetivo replicar o aumentar los resultados de dureza obtenidos en la muestra 7 del ensayo 2 mediante la variación de la temperatura de revenido de 505°C y 905°C.

Al momento de realizar el tratamiento térmico no se respetó el tiempo de permanencia establecido a temperatura de temple, motivo por el cual no se consideraron como válidas para la realización de los ensayos de desgaste a estas muestras. Los detalles de los

tratamientos realizados en este ensayo se adjuntan en el Anexo C

De igual manera que en los dos ensayos anteriores se midió la dureza en cada una de las muestras y se verificó que el tiempo de permanencia a temperatura de austenización no fue la adecuada provocando que la dureza de las muestras del ensayo 3 no se incrementara con respecto a la dureza obtenida del ensayo base. Los valores de dureza de este ensayo se adjuntan en el Anexo D

- Ensayo 4

El ensayo 4 se realizó en base a verificación de datos obtenidos durante el ensayo 2, y considerando que el ensayo 3 terminó fallido, fue necesario conocer si los parámetros establecidos durante el ensayo 2 fueron los adecuados, adicionalmente se estableció un nuevo parámetro (temple en aceite) el cual también se encuentra bajo objeto de comparación.

Tabla 18-4: Detalles del ensayo 4. Muestras sometidas a temple en agua y aceite, y revenido.

Número de ensayo: 4						
Parámetros	Tratamiento térmico	Temperatura de mufla	Tiempo de permanencia en la mufla	Tipo de enfriamiento	Tiempo de enfriamiento	Comentarios
		°C	Min	-	Min	
Muestra 14	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno	-	
Muestra 15	Temple en aceite	925	30-35	Enfriamiento en aceite	70 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno	-	

Nota: Se validan con los datos obtenidos en el ensayo 2.

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Detalles de los resultados obtenidos en las muestras del ensayo 4.

Tipo de ensayo: Dureza Rockwell C

Tratamiento: Temple (agua, aceite) y revenido a 705°C

Carga (P): $P = 150 \text{ kgf}$ o $P = 1471 \text{ N}$

Identador: cono de diamante.

El durómetro presenta de manera directa los valores de dureza en escala Rockwell C.



Figura 6-4: Muestras templadas en aceite y agua y revenidas a 705°C

Fuente: Autor

Tabla 19-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 4.

Número de ensayo: 4				
Ensayo de dureza	Dureza Rockwell	Dureza Brinell	Tratamiento térmico	Comentarios
Simbología	HRC	HB		
Muestra 14	23	241	Temple a 925°C (agua) y Revenido a 705°C	La muestra presenta características similares respecto a la muestra 7.
	24	248		
Muestra 15	20	223	Temple a 925°C (aceite) y Revenido a 705°C	La muestra presenta elevación en la dureza respecto al ensayo base.
	22	235		
Nota: Se tiene como único ensayo el ensayo de dureza Rockwell. La conversión de escalas de dureza se realizó según la norma ASTM E140.				

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

En el ensayo 4 se obtuvieron valores de dureza superiores a los valores de dureza del ensayo base, además que se replicó los parámetros establecidos en el ensayo 2, se establece que las muestras obtenidas de este ensayo serán utilizadas en el ensayo de desgaste.

- Ensayo 5

El ensayo 5 se realizó con el fin de obtener el número de muestras establecidas por la

Norma ASTM G65 para los ensayos de desgaste

Se declara fallido el ensayo 5 debido a que no se respetó uno de sus principales parámetros, el tiempo de revenido, el cual se estableció en 45 minutos. Los detalles de los tratamientos realizados en este ensayo se adjuntan en el Anexo E.

De igual manera que en los ensayos anteriores se midió la dureza en cada una de las muestras del ensayo 5, obteniendo como resultado durezas similares a la obtenida en el ensayo base. Los valores de dureza de este ensayo se adjuntan en el Anexo F.

- *Ensayo 6*

El ensayo 6 se realizó en base a verificación de datos obtenidos durante el ensayo 4.

Tabla 20-4: Detalles del ensayo 6. Muestras sometidas a temple en agua y aceite, y revenido.

Número de ensayo: 6						
Parámetros	Tratamiento térmico	Temperatura de mufla	Tiempo de permanencia en la mufla	Tipo de enfriamiento	Tiempo de enfriamiento	Comentarios
		°C	Min	-	Min	
Muestra 16	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	-	
Muestra 17	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	-	
Muestra 18	Temple en agua	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	-	

Tabla 21-4: (Continua) Detalles del ensayo 6. Muestras sometidas a temple en agua y aceite, y revenido.

Muestra 19	Temple en aceite	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	-	
Muestra 20	Temple en aceite	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	-	
Muestra 21	Temple en aceite	925	30-35	Enfriamiento en agua	45 seg	-
	Revenido	705	45	Enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno.	1440	
Nota: Se validan los datos obtenidos en el ensayo 4.						

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Detalles de los resultados obtenidos en las muestras del ensayo 6.

Tipo de ensayo: Dureza Rockwell C

Tratamiento: Temple (agua, aceite) y revenido

Carga (P): $P = 150 \text{ kgf}$ o $P = 1471 \text{ N}$

Identador: cono de diamante.

El durómetro presenta de manera directa los valores de dureza en escala Rockwell C.

Tabla 22-4: Detalles del ensayo de dureza en el Ensayo 6.

Número de ensayo: 6				
Ensayo de dureza	Dureza Rockwell	Dureza Brinell	Tratamiento térmico	Comentarios
Simbología	HRC	HBW		
Muestra 22	24	248	Temple a 925°C (agua) y Revenido a 705°C	Las muestras presentan características similares respecto a la muestra 14
Muestra 23				
Muestra 24				
Muestra 25	21	225	Temple a 925°C (aceite) y Revenido a 705°C	Las muestras presentan similitud en sus propiedades respecto a la muestra 15.
Muestra 26				
Muestra 27				
Nota: Se tiene como único ensayo el ensayo de dureza Rockwell. La conversión de escalas de dureza se realizó según la norma ASTM E140.				

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

El ensayo 6 valida los datos obtenidos durante el ensayo 4 después de haber realizado el ensayo de dureza, además las muestras obtenidas en este ensayo serán utilizadas durante la realización del ensayo de desgaste.

- *Principales propiedades mecánicas de aleaciones de aceros con alto contenido de manganeso.*

Dentro de las propiedades mecánicas de los materiales, la dureza es una de las principales características, puesto que se relaciona con propiedades como la fragilidad, la resistencia al desgaste entre otros, de modo que es necesario conocer rangos de dureza dentro de los cuales se puede validar los resultados obtenidos durante el ensayo de dureza aplicadas a las muestras, así pues la norma ASTM A128 establece rangos de dureza para aceros con alto contenido de carbono.

Tabla 23-4: Aceros Austeníticos fundidos según la norma ASTM A 128.

Propiedades Mecánicas		
Grado	Dureza Brinell	Resistencia de impacto
	HBW	CVN
A	160	114
B-1		
B-2		
B-3		
B-4	190	31
C		
D		
E-1	185	74
E-2		
F (J91340)	160	38

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ASM International Committee, 1995)

Teniendo en cuenta que los parámetros establecidos en la norma ASTM A128 no necesariamente deben cumplirse es importante conocer las variaciones en las propiedades mecánicas que pueden presentar los aceros con alto contenido de manganeso dentro de la industria, ALRO una empresa establecida y dedicada al manejo de este tipo de aceros establece las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 24-4: Aceros con alto contenido de manganeso. Principales propiedades mecánicas

Contenido de manganeso entre 11-14%				
Propiedades	Dureza Brinell	Resistencia a la tracción	Límite elástico	Elongación
Unidades	HBW	N/mm ²	N/mm	%
	200 aprox.	880	320	40

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: (ALRO)

4.1.4. *Ensayo de metalografía en muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente.*

El ensayo de metalografía se realizó fundamentalmente para conocer las fases presentes en la microestructura de las muestras, de modo que se pueda establecer semejanzas en base a especificación ASM Metals Handbook y de ese determinar el tipo de acero o la familia dentro de la cual se puede encasillar nuestro objeto de estudio. Las microestructuras que presentan las muestras son muy importantes, como la composición

química del mismo debido a que en ambos casos se puede establecer características que nos ayuden a entender a qué se debe el incremento de la dureza en las muestras templadas (agua, aceite) y revenidas.

- *Procedimiento para ensayo de metalografía.*

Las muestras deben cumplir el ensayo de preparación de muestras basado en la norma ASTM E3-95 descrito en el capítulo anterior. Para tomar registro de las microestructuras presentes en las muestras se realizó la toma de fotos a una magnificación de 100X, 200X y 500X.

Tabla 25-4: Procedimiento para ensayos de metalografía.




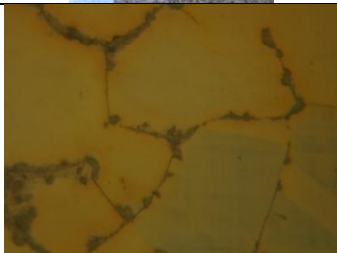
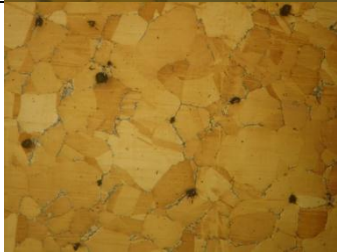
Ensayo de metalografía				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
Condiciones iniciales de la muestras				
1	Preparación de las muestras según ASTM E3	Muestras, lijas, máquinas pulidoras, paño.	30 min	
2	Limpieza y secado de la muestra	Agua, compresor	5 min	
3	Se ataca la muestra con nital al 2% según ASTM E407	Nital al 2%	10 seg aprox.	
4	Se detiene el ataque químico según ASTM E407 y se realiza un secado en la muestra.	Agua, compresor, algodón	5 min aprox.	

Tabla 26-4: (Continua) Procedimiento para ensayos de metalografía.

Para observar la estructura metalográfica				
5	Verificar conexiones eléctricas y encender el equipo	Microscopio óptico	1-5 min	
6	Colocar la muestra en el microscopio.	Muestra atacada químicamente	5 min aprox.	
7	Observar la estructura metalográfica presente en el acero con ayuda de lentes a 100X, 200X, 500X.	Microscopio óptico, lentes de ampliación a 100X, 200X, 500X.	30 min aprox.	
8	Cuando se ha observado las zonas existentes en microestructura se procede a realizar la toma de fotos con cada lente de ampliación respectivamente.	Cámara digital	30 min	
9	Retirar la muestra de la superficie del microscopio y protegerla con algodón para evitar daños en la zona de estudio.	Muestra, algodón	5 min	
Nota: la protección con algodón de la muestra se realiza en caso que sea necesario volver a observar la zona atacada químicamente por objeto de estudio				

Realizado por: Lorena Córdova

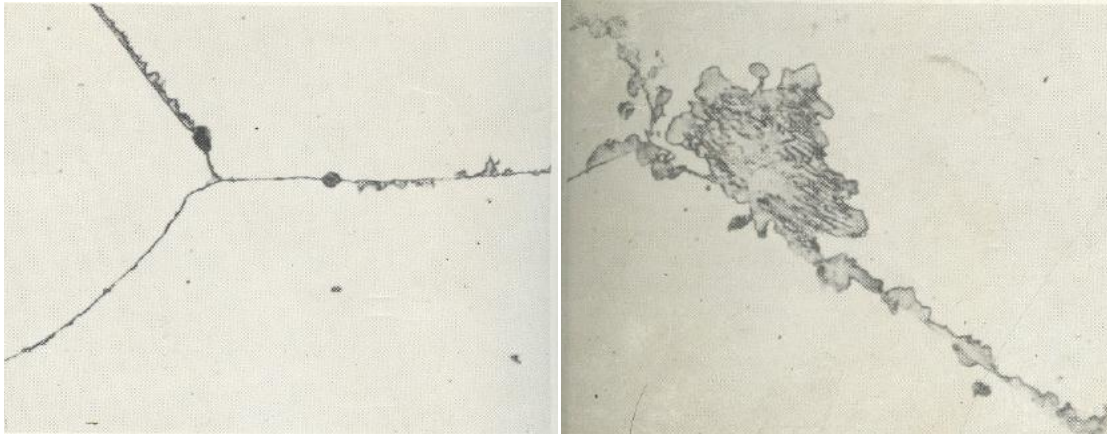
Fuente: Autor

- *Fundiciones de Acero al Manganeso Austenítico*

De acuerdo a lo observado durante el ensayo metalográfico y teniendo en cuenta la composición química presente en este tipo de aceros, determinado según ensayo de espectrometría se pueden establecer semejanzas entre las microestructuras propuestas

para fundiciones de acero austeníticos al manganeso bajo especificación ASM Committee on Metallography of Steel Castings para Microestructuras de Fundiciones de Acero.

La Figura 7-4 muestra fotografías tomadas de la ASM Committee on Metallography of Steel Castings, las mismas que muestran algunas características que serán sujetos o base de comparación con las microestructuras determinadas en nuestro estudio.



a) Acero al manganeso de 1 in de espesor b) Acero al manganeso de 3 in de espesor

Figura 7-4: Microestructura en ASTM A128 en aceros austeníticos al manganeso, grado B-3.

Fuente: (ASM Committee on Metallography of Steel Castings)

En la Figura 7-6(a) se muestra la microestructura de un acero austenítico al manganeso atacado con nital al 2 ½ % a una magnificación de 500X, de grado B-3, de 1 in de espesor. Las líneas negras son los límites del grano austenítico y los constituyentes negros que se observan son carburo de límite de grano.

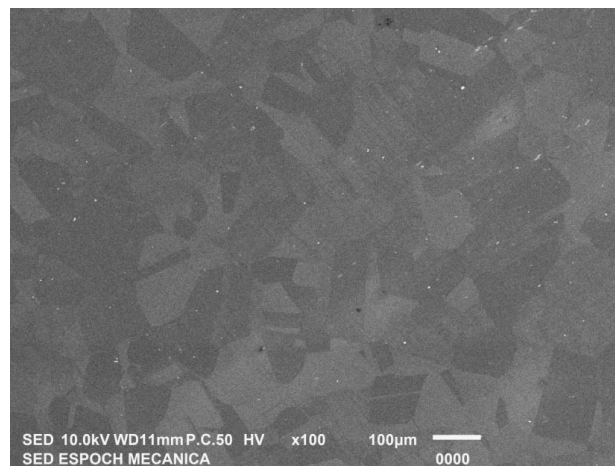
En la Figura 7-4(b) se muestra la microestructura del mismo acero austenítico al manganeso que en la figura 7-4(a) atacado con nital al 2 ½ % a una magnificación de 500X con 3 in de espesor. Los componentes grises son carburos grandes, que se encuentran principalmente en los límites de los granos.

Resultados.

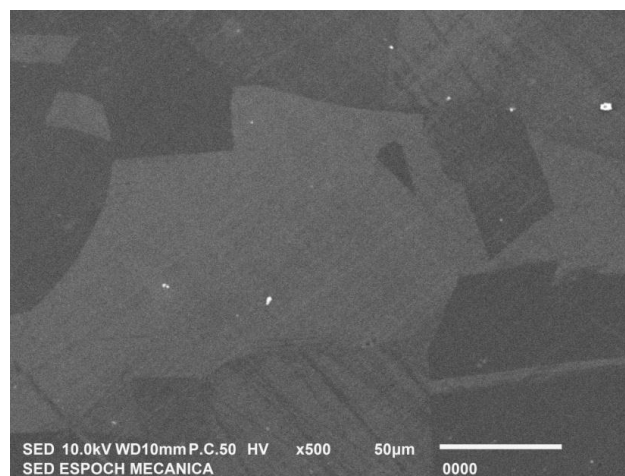
Los resultados mostrados a continuación pertenecen a los muestras que se someterán a los ensayos de desgaste es decir en estado de suministro, temple (agua) y temple (aceite).

Al finalizar el ensayo de metalografía se observó en las muestras una particularidad en especial, pues aparentemente todas las microestructuras observadas presentan la misma morfología tanto en muestras en estado de suministro como en muestras tratadas térmicamente. Es decir no presentó ningún cambio en sus fases, con lo cual se puede verificar la función del manganeso en este tipo de aleaciones, pues al tratarse de aceros con alto contenido de manganeso (13,3% Mn) este elemento tiende a estabilizar las matriz austenítica. (GARCÍA, y otros, 2010) Otra particularidad presente en la microestructura son los carburos de manganeso, los cuales no pueden tratarse o ser considerados como impurezas puesto que en este tipo de aleaciones tienen a ayudar a la dureza del material. (HIGUERA COBOS, y otros, 2010)

- *Muestra en estado de suministro.*



a) Fotografía tomada a una magnificación de 100X



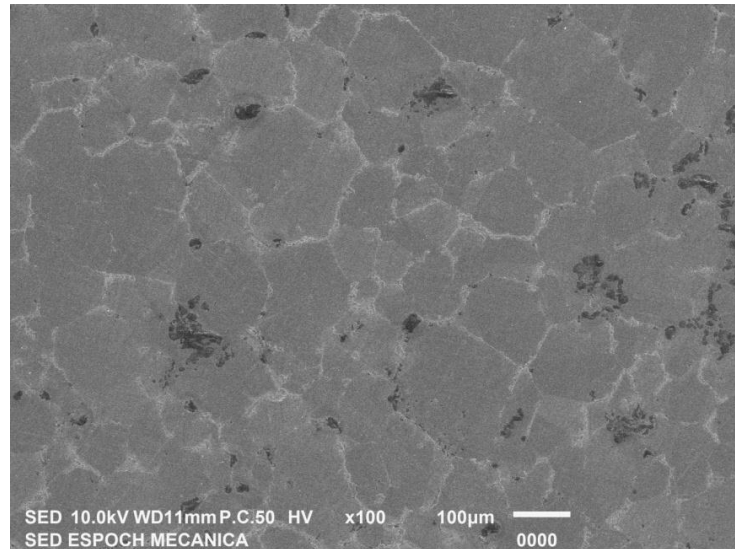
b) Fotografía tomada a una magnificación de 500X

Figura 8-4: Microestructura tomada a 100X y 500X en la muestra en estado de suministro.

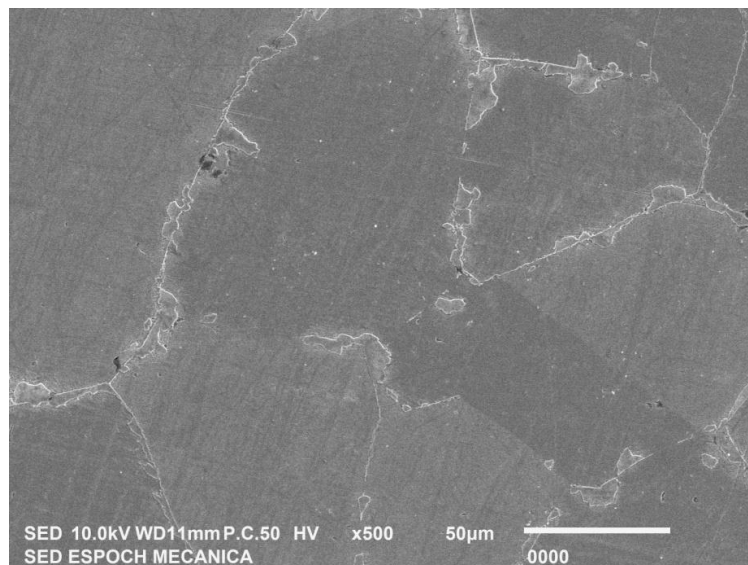
Fuente: Autor

La microestructura presentada de la muestra en estado de suministro a tres tipos de magnificaciones 100X y 500X, se observa una microestructura austenítica con límites de grano libre de carburos.

- *Muestra templada (aceite) y revenido.*



a) Fotografía tomada a una magnificación de 100X



b) Fotografía tomada a una magnificación de 500X

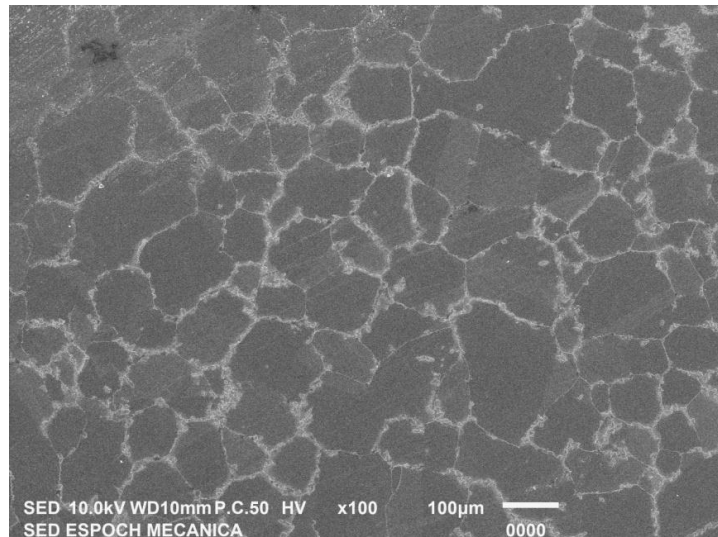
Figura 9-4: Microestructura tomada en la muestra 15 (Temple y Revenido), 100X y 500X

Fuente: Autor

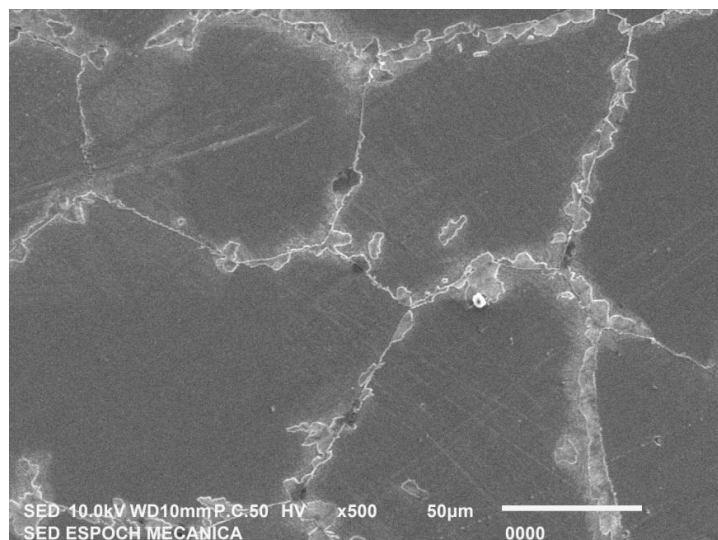
En la Figura 9-4 se observa la morfología de la muestra sometida a temple a temperatura de 925°C durante 35 minutos, medio de enfriamiento (aceite) y revenida a 705°C durante 45 minutos con enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno, atacada con nital

al 2%, con una magnificación de 100X, 200X y 500X presenta una microestructura austenítica, donde las líneas negras representan el límite de grano y se presume la aparición de carburos de manganeso, los mismos que su mayoría podrían haber nucleado en los límites de grano como se puede observar. (HIGUERA COBOS, y otros, 2010)

- *Muestra templada (agua) y revenido.*



a) Fotografía tomada a una magnificación de 100X



b) Fotografía tomada a una magnificación de 500X

Figura 10-4: Microestructura tomada en la muestra 7 (Temple y Revenido), 100X y 500X

Fuente: Autor

En la Figura 10-4 se observa las fotografías de la microestructura de la muestra 7 sometida a temple a temperatura de 925°C durante 35 minutos, medio de enfriamiento (agua) y revenida a 705°C durante 45 minutos, con enfriamiento a temperatura ambiente dentro

del horno, atacada con nital al 2%, con magnificación de 100X y 500X no presentó cambio en su morfología es decir la microestructura sigue siendo austenítica, con posibles precipitaciones de carburos de manganeso en los límites de grano y dentro del grano, además se puede observar una mejor distribución de carburos en toda la matriz a diferencia de la microestructura de la Figura 9-4.

La existencia de carbono (C) y manganeso (Mn) así como óxido de hierro (FeO) y óxido de manganeso (MnO) se corrobora mediante análisis Energy Disperse Spectrometry (EDS) realizado en el límite de grano y dentro del grano austenítico. Los resultados de este análisis se adjuntan en el Anexo G y Anexo H respectivamente.

En este punto de la investigación se vio necesario medir microindentaciones Vickers en las muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente con el fin de establecer la dureza de los carburos en caso de tenerlos.

Para medir la dureza Vickers se debe indentar la muestra con una carga de 300gf y mantenerla por 10 segundos, una vez marcada la huella se debe medir las dos diagonales, posterior a esto se saca un promedio de las mismas y con este valor promedio nos dirigimos a la tabla de dureza Vickers en la cual se establece las durezas correspondientes (ver Anexo K)

En la tabla 19-4 se muestran los valores de durezas que comprenden una mezcla de carburos con la matriz en diferentes zonas de la microestructura de las muestras como se detalla a continuación.

Tabla 27-4: Microindentación Vickers

Indentación	Estado de suministro	Observaciones	Indentación	Temple y revenido	Observaciones
μm	HV		μm	HV	
45 45	275	Límite de grano	35 35	454	Aceite (dentro del grano)
42 41	331	Dentro del grano	28,5 27,5	710	Agua (dentro del grano)
41 40	339	Dentro del grano	28 27	735	Agua , Aceite (límite de grano)

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Los valores de durezas presentadas por las probetas sometidas a temple (agua, aceite) y

revenido tienen la misma dureza en los límites de granos donde se encuentran carburos, mientras que dentro del grano la dureza de la muestra templada en agua y revenida es superior a la dureza obtenida de la muestra templada en aceite y revenida, esto se debe a la mejor distribución de carburos que presenta el temple en agua. (GARCÍA, y otros, 2010) La probeta en estado de suministro presenta durezas inferiores que las obtenidas de las muestras templadas y revenidas en el límite de grano como dentro del mismo, esto se debe a la ausencia de carburos como se puede ver en la Figura 8-4.

4.1.5. Ensayo de desgaste de las muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente (elementos moledores).

El ensayo de desgaste que se realizó es Tipo B, el cual establece el periodo de 10 minutos por cada muestra a ensayar, con un flujo de abrasivo de aproximadamente 250 gramos por minuto, el tipo de ensayo se estableció en base a la naturaleza de las muestras a ensayar, las muestras presentadas se encuentran en estado de suministro y tratadas térmicamente, además se realizó ensayos de dureza para determinar la similitud o variación de durezas entre las muestras y de ese modo en base a parámetros establecidos en la norma ASTM G65 (ASTM Committee on Standards, 2004) se determinó el tipo de ensayo de desgaste.

- *Abrasivo o arena de prueba.*

La norma ASTM G 65 establece que el tipo de material abrasivo sea arena de sílice AFS (50-70), la misma se encuentra disponible en el laboratorio de fundición de la Facultad de Mecánica en las instalaciones de la ESPOCH, sin embargo para satisfacer los requerimientos establecidos en la norma se debe realizar un tamizaje del abrasivo para cumplir con la granulometría recomendada y además previo a su uso se debe realizar un proceso de secado en mufla para retirar la humedad existente en el abrasivo. Debido al tipo de procedimiento, la cantidad aproximada de abrasivo es de 250 gramos por minuto, la cantidad total de abrasivo requerido para la realización del ensayo se determinó en base al número de muestras a ensayar.

Tabla 28-4: Procedimiento de obtención y secado del abrasivo para el ensayo de desgaste.








Material abrasivo: Arena de sílice AFS (50-70)				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
Condiciones iniciales del abrasivo: Tamizaje de abrasivo según granulometría recomendada				
1	Muestras a ensayar: 12	250 gr/min 2500 gramos por muestra aprox.	---	
2	Cantidad de abrasivo recomendado: 15 kg*	Abrasivo AFS (50-70)	---	
3	Tamizaje del abrasivo o arena de prueba según granulometría recomendada.	AFS (50-70) o tamiz (# 20)	240 min	
4	Obtención de abrasivo a temperatura ambiente.	15 kg de abrasivo		

Tabla 29-4: (Continua) Procedimiento de obtención y secado del abrasivo para el ensayo de desgaste.

Condiciones para el uso del abrasivo: Secado de abrasivo (<i>retirar la humedad del abrasivo</i>)				
5	Revisar las conexiones eléctricas y encender el equipo	Mufla	5 min aprox	
6	Establecer la temperatura en la mufla: $T=(80 - 100) ^\circ\text{C}$; temperatura requerida para el secado del abrasivo	Mufla	15-20 min	
7	Secado del abrasivo	2000 gramos de abrasivo aprox. por cada 10 min	130 min aprox.	
8	Obtención del abrasivo, después del secado.	15 kg de abrasivo		
*Nota: la cantidad recomendada de abrasivo depende del número de muestras a ensayar				

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Resultados.

El material abrasivo presenta una granulometría uniforme y después de haber sido sometida a un proceso de secado el abrasivo o arena de prueba se encuentra totalmente seca y libre de humedad, este proceso es necesario puesto que el abrasivo debe presentar excelente fluidez, de modo que al iniciar el ensayo en la máquina de desgaste el flujo de abrasivo sea constante y uniforme evitando así posibles errores durante el ensayo.

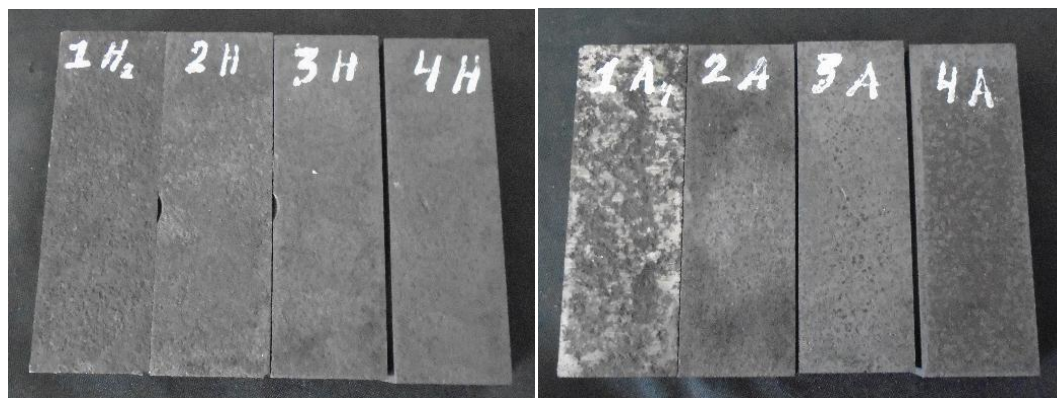
- *Procedimiento de desgaste en muestras según ASTM G65.*

El ensayo de desgaste se realiza en las muestras tomadas de la placa de acero; un total de doce muestras, de donde cuatro muestras se encuentran en estado de suministro, las ocho restantes provienen de los tratamientos térmicos realizados anteriormente de los cuales cuatro pertenecen a temple en agua y cuatro a temple en aceite, todas las muestras fueron sometidas a ensayos de dureza para verificar que presenten características similares y evitar posibles errores en el desarrollo del trabajo de investigación.



Figura 11-4: Muestras a ensayar en estado de suministro.

Fuente: Autor



(a) Temple en agua

(b) Temple en aceite

Figura 12-4: Muestras tratadas térmicamente, temple (925°C) y revenido (705°C)

Fuente: Autor

Tabla 30-4: Procedimiento del ensayo de desgaste en muestras según ASTM G 65



Procedimiento de ensayo de desgaste: ASTM G65				
Fase	Detalle	Materiales	Duración	Descripción gráfica
Ensayo de desgaste: Tipo B				
1	Tomar las dimensiones y pesar la muestra a ensayar	Balanza Técnica	5-10 min	
2	Revisión de conexiones eléctricas: conexión trifásica de 220V	Conexiones- Máquina de desgaste	10 min aprox.	
3	Verificar el buen estado de funcionamiento de la máquina de desgaste	Máquina de desgaste	10 min aprox.	

Tabla 31-4: (Continua) Procedimiento del ensayo de desgaste en muestras según ASTM G65

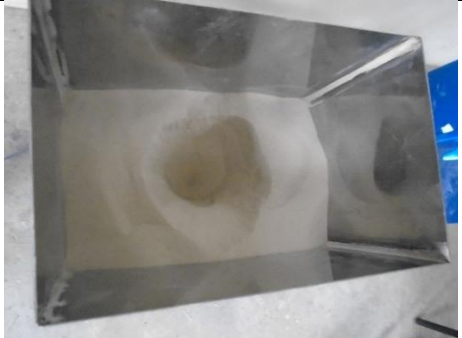




4	Colocar el abrasivo o arena de prueba en la tolva de la máquina de desgaste	Abrasivo: 2500 gramos apr00x por muestra	1-5 min	
5	Verificación del buen estado de la boquilla de salida de arena	Boquilla de salida- Máquina de desgaste	1-5 min	
6	Ajuste de la muestra en el equipo mediante la ayuda de pernos de sujeción	Muestras de acero al Mn, llaves de ½	5-10 min	
7	Encender el equipo	Máquina de desgaste	1-3 min aprox.	

Tabla 32-4: (Continua) Procedimiento del ensayo de desgaste en muestras según ASTM G65

7	Encender el equipo	Máquina de desgaste	1-3 min aprox.	
8	Colocar la carga de 130 N de contrapeso	Pesa de 130 N	1-3 min aprox.	
9	Mediante cronómetro se realizó la toma de tiempos durante el ensayo de desgaste.	Cronómetro	10 min	
10	Se apaga el equipo cuando se observa que el cronómetro marca 10 min	Máquina de desgaste	1 min aprox.	
11	Se retira el contrapeso y esperar que la zona de trabajo del equipo se enfríe.	Rueda con recubrimiento de caucho- Máquina de desgaste y la muestra	5 min aprox.	

Tabla 33-4: (Continua) Procedimiento del ensayo de desgaste en muestras según ASTM G65

12	Retirar la muestra una vez que los pernos de sujeción son aliviados.	Llaves de ½	5-10 min	
13	Al terminar el ensayo se debe volver a pesar la muestra	Balanza Técnica	5-10 min	
Nota: Verificar el suministro de abrasivo para evitar posibles fallas durante la realización del ensayo de desgaste.				

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Resultados del ensayo de desgaste en las muestras de acero al manganeso (13,3%Mn)

Las muestras tomadas de la placa de acero después de ser sometidas a desgaste abrasivo presentan una pérdida en su masa debido a la abrasión a la que fue sometida, la huella marcada cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM G65, en lo referente a validación de huellas, además por objeto de comparación y estudio se detallan a continuación las condiciones iniciales de las muestras y condiciones finales al haber terminado el ensayo.

- *Detalles de muestras en estado de suministro*

Tabla 34-4: Detalles de las muestras en estado de suministro.



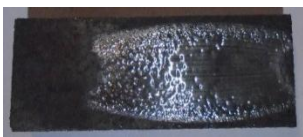









Característica de las muestras: Estado de suministro								
Probeta / Dimensiones	Antes				Después			
	Longitud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_1	Longitud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_2
1	76	25,2	12	183,65	76	25,2	12	181,87
								

Tabla 35-4: (Continua) Detalles de las muestras en estado de suministro.

2	76,8	26	12	183,55	76,8	26	12	181,43
								
3	76,5	26	12	183,68	76,5	26	12	182,00
								
4	76,4	25,4	12,1	183,27	76,4	25,4	12,1	181,14

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo de volumen perdido corregido AVL para muestras en estado de suministro.

Principal característica: muestras en estado de suministro.

Masa perdida (m_p): $m_p = m_1 - m_2$

Diámetro del disco antes del ensayo (D): $D = 228,6 \text{ mm}$

Diámetro del disco después del ensayo (d_{dp}): $d_{dp} = 226,6 \text{ mm}$

Número de muestras (n): $n = 4$

Tabla 36-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.

Propiedad	Volumen	Densidad	Masa perdida	Volumen perdido	Volumen perdido corregido: AVL
Unidades	$[mm^3]$	$[gr/cm^3]$	$[gr]$	$[mm^3]$	$[mm^3]$
Ecuación	$v = l \times a \times e$	$\rho = m_1/v$	$m_p = m_1 - m_2$	$V = m_p/\rho$	$AVL = V \times (228,6/d_{dp})$
Muestra 1	22982,400	7,991	1,78	222,741	224,707
Muestra 28	23961,600	7,660	2,12	276,756	279,198
Muestra 29	23868,000	7,695	1,68	218,304	220,231
Muestra 30	23480,776	7,805	2,14	274,164	276,584

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo del coeficiente de variación para muestras en estado de suministro.

Volumen perdido corregido AVL Promedio (\bar{X}):

$$\bar{X} = \frac{\sum AVL}{n} = \frac{224,707 + 279,198 + 220,231 + 276,584}{4}$$

$$\bar{X} = 250,180 [mm^3]$$

Rango (R):

$$R = V_2(\text{mayor valor de volumen perdido}) - V_1(\text{menor valor de volumen perdido})$$

$$R = 276,756 - 218,304 = 58,451 [mm^3]$$

Desviación estándar (S):

$$S = \frac{R}{d_2} = \frac{58,451}{2,33}$$

$$S = 25,086$$

Coeficiente de variación (CV):

















$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{25,086}{250,180} \times 100$$

$$CV = 10 \%$$

El coeficiente de variación es de 10 % siendo igual al límite máximo permitido (10%) según lo establece la norma ASTM G65, es decir el procedimiento realizado está bajo control.

- *Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en agua.*

Tabla 37-4: Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en agua.

Característica de las muestras: Temple (925 °C) en agua – Revenido (705 °C)								
Pro beta / Dim ensi ones	Antes				Después			
	Longit ud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_1	Longit ud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_2
1	76,5	26	11,5	176,59	76,5	26	11,5	176,10
								
2	76,5	26	12	181,22	76,5	26	12	180,83
								
3	75,8	25	12	180,53	75,8	25	12	180,10
								
4	76,5	26	12	181,26	76,5	26	12	180,87
								

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo de volumen perdido corregido AVL para muestras tratadas térmicamente.

Principal característica: Temple en agua.

Masa perdida (m_p): $m_p = m_1 - m_2$

Diámetro del disco antes del ensayo (D): $D = 228,6 \text{ mm}$

Diámetro del disco después del ensayo (d_{DP}): $d_{DP} = 226,6 \text{ mm}$

Número de muestras (n): $n = 4$

Tabla 38-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.

<i>Propiedad</i>	Volumen	Densidad	Masa perdida	Volumen perdido	Volumen perdido corregido: AVL
<i>Unidades</i>	$[mm^3]$	$[gr/cm^3]$	$[gr]$	$[mm^3]$	$[mm^3]$
<i>Ecuación</i>	$v = l \times a \times e$	$\rho = m_1/v$	$m_p = m_1 - m_2$	$V = m_p/\rho$	$AVL = V \times (228,6/d_{dp})$
Muestra 7	22873,5	7,720	0,49	63,469	64,029
Muestra 22	23865,0	7,593	0,39	51,359	51,812
Muestra 23	22740,0	7,938	0,43	54,163	54,641
Muestra 24	23868,0	7,594	0,39	51,354	51,807

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo del coeficiente de variación para muestras para muestras tratadas térmicamente.

Volumen perdido corregido AVL Promedio (\bar{X}):

$$\bar{X} = \frac{\sum AVL}{n} = \frac{64,029 + 51,812 + 54,641 + 51,807}{4}$$

$$\bar{X} = 55,572 [mm^3]$$

Rango (R):

$$R = V_2(\text{mayor valor de volumen perdido}) - V_1(\text{menor valor de volumen perdido})$$

$$R = 63,469 - 51,354 = 12,114 [mm^3]$$

Desviación estándar (S):

$$S = \frac{R}{d2} = \frac{12,114}{2,33}$$

$$S = 5,199$$

Coeficiente de variación (CV):















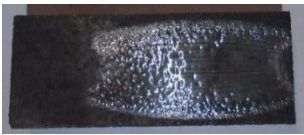

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{5,199}{55,572} \times 100$$

$$V = 9,35 \%$$

El coeficiente de variación es de 9,35 % por debajo del límite máximo permitido (10%) según lo establece la norma ASTM G65, es decir el procedimiento realizado está bajo control.

- *Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.*

Tabla 39-4: Detalles de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.

Característica de las muestras: Temple (925°C) en aceite – Revenido (705 °C)								
	Antes				Después			
Pro beta / Dim ensi ones	Longit ud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_1	Longit ud: l (mm)	Ancho: a (mm)	Espesor: e (mm)	Masa (gr) m_2
1	76	26	11,5	176,32	76	26	11,5	173,82
								
2	76	25,3	11,5	181,30	76	25,3	11,5	178,87
								
3	75,8	25	12	180,63	75,8	25	12	177,97
								
4	76	25,2	11,8	182,50	76	25,2	11,8	179,87
								

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo de volumen perdido corregido AVL para muestras tratadas térmicamente.

Principal característica: Temple en aceite.

Masa perdida (m_p): $m_p = m_1 - m_2$

Diámetro del disco antes del ensayo (D): $D = 228,6 \text{ mm}$

Diámetro del disco después del ensayo (d_{DP}): $d_{DP} = 225,6 \text{ mm}$

Número de muestras (n): $n = 4$

Tabla 40-4: Cálculo de volumen, densidad, volumen perdido y volumen perdido corregido.

<i>Propiedad</i>	Volumen	Densidad	Masa perdida	Volumen perdido	Volumen perdido corregido: AVL
<i>Unidades</i>	$[mm^3]$	$[gr/cm^3]$	$[gr]$	$[mm^3]$	$[mm^3]$
<i>Ecuación</i>	$v = l \times a \times e$	$\rho = m_1/v \times 1000$	$m_p = m_1 - m_2$	$V = m_p/\rho \times 1000$	$AVL = V \times (228,6/d_{DP})$
Muestra 15	22724,0	7,759	2,50	322,198	326,483
Muestra 25	22112,2	8,199	2,43	296,374	300,315
Muestra 26	22740,0	7,943	2,66	334,874	339,327
Muestra 27	22599,36	8,075	2,63	325,678	330,009

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Cálculo del coeficiente de variación para muestras para muestras tratadas térmicamente.

Volumen perdido corregido AVL Promedio (\bar{X}):

$$\bar{X} = \frac{\sum AVL}{n} = \frac{326,483 + 300,315 + 339,327 + 330,009}{4}$$

$$\bar{X} = 324,033 [mm^3]$$

Rango (R):

$$R = V_2(\text{mayor valor de volumen perdido}) - V_1(\text{menor valor de volumen perdido})$$

$$R = 334,874 - 296,374 = 36,304 [mm^3]$$

Desviación estándar (S):

$$S = \frac{R}{d2} = \frac{36,304}{2,33}$$

$$S = 15,581$$

Coeficiente de variación (CV):

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{15,581}{324,033} \times 100$$

$$CV = 4,8 \%$$

El coeficiente de variación es de 4,8 % por debajo del límite máximo permitido (10%) según lo establece la norma ASTM G65, es decir el procedimiento realizado está bajo control.

- *Flujo de material abrasivo*

Para determinar el flujo de material abrasivo se utilizó un tacómetro, mediante el cual se determinó que la cantidad de material abrasivo fue de 275 gramos por cada minuto aproximadamente, también se pudo determinar que la cantidad de abrasivo aproximado para desgastar una probeta en un periodo de 10 minutos fue de 2355 gramos, el abrasivo es de tipo seco por condiciones de norma ASTM G65.



Figura 13-4: Material abrasivo utilizado durante el ensayo de desgaste para una muestra.

Fuente: Autor

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de manera comparativa de las muestras que fueron sometidas a tratamientos térmicos y ensayos de dureza de forma conjunta puesto que se relacionan de forma directa, debido a la necesidad de validación y rechazo de las muestras que fueron utilizadas durante el ensayo de desgaste; se realiza también el análisis comparativo de las estructuras metalográficas presentes en las muestras en estado de suministro y tratadas térmicamente, para determinar posibles variaciones en su estructura. Finalmente se realiza el análisis del ensayo de desgaste en las doce muestras para determinar si el uso de tratamientos térmicos tiene un efecto positivo en lo referente a mejora de las propiedades mecánicas de las muestras.

5.1. Resultados obtenidos en tratamientos térmicos y ensayos de dureza de las muestras.

A lo largo de este trabajo de investigación se realizaron seis ensayos de los cuales los datos obtenidos del ensayo uno sirvieron como base para la realización de los siguientes ensayos.

- Ensayo 1

El ensayo 1 estuvo conformado por tres muestras, la muestra uno fue sometida a análisis de espectrometría del cual se obtuvo la composición química del material obteniendo como resultado que se trataba de una aleación con un alto contenido de manganeso (13,3%) y un contenido de carbono del 0.7%, con estos datos fue posible establecer que se trataba de un Acero al manganeso o mejor conocido como acero Hadfield de grado D según la Norma ASTM A128, se debe considerar que la composición química de los aceros Hadfield puede variar dependiendo del fabricante.

Se estableció una temperatura de austenización de 925°C y una temperatura de revenido de 705°C con un tiempo de permanencia a dichas temperaturas de 30 minutos y 45

minutos respectivamente.

Posteriormente se midió la dureza en la probeta en estado de suministro obteniendo una dureza de 202 HBW, este valor fue comparado con los valores de dureza establecidos en la Norma ASTM A128 para un acero al manganeso tipo D que es de 190HBW y con el valor de dureza establecido por el fabricante (ALRO) que es de 200HBW, se puede observar que existe una pequeña variación entre los valores de dureza esto se debe a que la norma es una guía.

- *Ensayo 2.*

En el ensayo dos se realizaron varios tratamientos térmicos y estos fueron: recocido, normalizado, temple, temple y revenido los mismos que se realizaron con las temperaturas y tiempos establecidos mediante el ensayo uno.

Con este ensayo se buscó conocer si alguno de los tratamientos térmicos antes mencionados aumentó la dureza del material.

El temple (agua) y revenido muestra 7 presentó un incremento de dureza de un 23% en relación al ensayo base, por esta razón se considera a esta muestra apta para el ensayo de desgaste.

El temple (aceite) y revenido muestra 15 presentó un incremento de dureza de un 11% en relación al ensayo base, por esta razón se considera a esta muestra apta para el ensayo de desgaste.

En base a los valores de dureza alcanzados en la muestra 7 y 15 se aprobaron o rechazaron otras muestras ensayadas. Las muestras aprobadas fueron sometidas a ensayos de desgaste.

En el Figura 1-5 se presenta la variación de dureza dependiendo del tratamiento térmico al que fue sometida la muestra.

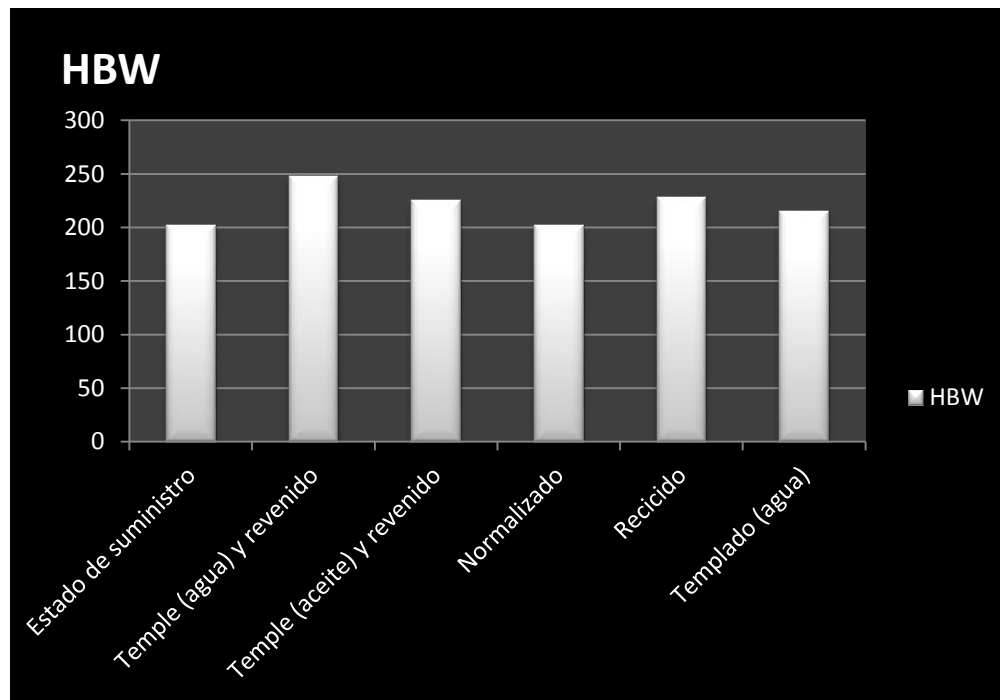


Figura 1-5: Durezas vs Tratamientos térmicos

Fuente: Autor

En este grafico se puede observar que con el temple en agua y revenido se obtuvo la mayor dureza siendo de 248HBW, seguida por el temple en aceite y revenido con una dureza de 225HBW. La muestra recocida a pesar de presentar un incremento en la dureza no se la considera, debido a que el recocido es una técnica utilizada para devolver a los aceros al estado de equilibrio (GARCIA CUETO, 2016) Se someterán a ensayos de desgaste las muestras en: estado de suministro, temple (agua) y revenido y temple (aceite) y revenido.

En la Tabla 1-5 se muestra de manera resumida el total de muestras que fueron sometidas a tratamientos térmicos y ensayos de dureza, puesto que es necesario validar o rechazar las muestras que serán utilizadas en el ensayo de desgaste. Esto es posible debido a que los datos obtenidos mediante ensayos fueron comparados con especificación de fabricante y norma técnica ASTM A128, en lo referente a dureza como principal propiedad mecánica la misma que está relacionada con propiedades de desgaste.

Tabla 1-5: Resultados de tratamientos térmicos y dureza Brinell en las muestras.

Nº de Ensayo	Nº de Muestra	Tratamiento Térmico	Dureza Brinell HBW	Calificación
1	1	Estado de suministro	202	Estado inicial*
	2	Estado de suministro	202	Estado inicial*
	3	Recocido (925°C)	220	Rechazado
2	4	Recocido (925°C)	228	Rechazado
	5	Temple en agua (925°C)	215	Rechazado
	6	Normalizado (925°C)	202	Rechazado
	7	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	248	Aprueba
3	8	Temple en agua (925°C) y Revenido (505°C)	202	Rechazado
	9	Temple en agua (925°C) y Revenido (505°C)	202	Rechazado
	10	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	197	Rechazado
	11	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	197	Rechazado
	12	Temple en agua (925°C) y Revenido (905°C)	192	Rechazado
	13	Temple en agua (925°C) y Revenido (905°C)	192	Rechazado
4	14	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	248	Aprueba
	15	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	225	Aprueba
5	16	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado
	17	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado
	18	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado
	19	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado
	20	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado
	21	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	223	Rechazado

Tabla 2-5: (Continua) Resultados de tratamientos térmicos y dureza Brinell en las muestras.

6	22	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	248	Aprueba
	23	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	248	Aprueba
	24	Temple en agua (925°C) y Revenido (705°C)	248	Aprueba
	25	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	225	Aprueba
	26	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	225	Aprueba
	27	Temple en aceite (925°C) y Revenido (705°C)	225	Aprueba
-	28	Estado de suministro	202	Aprueba
	29	Estado de suministro	202	Aprueba
	30	Estado de suministro	202	Aprueba

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

* Durezas obtenidas en el material que sirven de base para aprobar o rechazar subsecuentes ensayos.

De acuerdo a la descrito en la Tabla 1-5, se establece que el número de muestras aprobadas son 12, las cuales cumplen con requisitos necesarios en cuanto a incremento de dureza se refiere, para el ensayo de desgaste se utilizaron: 4 muestras en estado de suministro, 4 muestras sometidas a temple en agua y revenido y 4 muestras sometidas a temple en aceite y revenido. El resto de muestras fueron rechazadas porque no alcanzaron un incremento de dureza debido a algunas variantes que fallaron durante los ensayos como son: el tiempo de temple, revenido y la temperatura de austenización los mismos.

5.2. Resultados de ensayo de metalografía realizado en las muestras.

El análisis de resultados de las muestras que fueron sometidas a ensayos metalográficos se centra principalmente en el tipo de microestructura que se encuentra presente en los acero con alto contenido de manganeso, así pues a continuación se detallan las características encontradas en las muestras.

Mediante un análisis comparativo entre las microestructuras obtenidas de las muestras en estado de suministro, temple (agua) y revenido, temple (aceite) y revenido con las

microestructuras tomadas de (ASM Committee on Metallography of Steel Castings) y de otras fuentes como fabricantes, se puede corroborar lo dicho por muchos autores como: (IGLESIAS, y otros, 2004) y (HIGUERA, y otros, 2007) al final de sus investigaciones concluyen que los aceros con un alto contenido de manganeso presenta siempre una matriz austenítica; es decir, no se produce cambio de fase como ocurre en las aleaciones ferrosas convencionales.

Esta característica propia de los aceros al manganeso o más comúnmente conocidos como acero Hadfield según (HIGUERA COBOS, y otros, 2010) se le atribuye al alto contenido de manganeso. Las propiedades que tiene el manganeso como elemento de aleación, de las cuales se destacan dos propiedades que influyen en los aceros: la primera es, el manganeso estabiliza la austenita evitando que ocurran cambios de fase (HIGUERA, y otros, 2007) y la segunda propiedad es la tendencia que tiene el manganeso a formar carburos. (PUENTE SANCHEZ, 1981)

Los tratamientos térmicos de temple (agua, aceite) y revenido aumentaron la dureza del material debido a la formación de carburos de manganeso.”Para los contenidos habituales de manganeso los únicos carburos que aparecen son $(Fe,Mn)_3C$ y, principalmente Mn_3C .” (VALENCIA GIRALDO, 2012). Esta información se corroboró mediante un análisis EDS realizado en las muestras, el cual se adjunta en el Anexo G, del mismo se obtuvo como resultado la presencia de carburos de manganeso además de óxido de hierro (FeO) y óxido de Manganeso (MnO). En la imagen del Anexo I el carburo de manganeso tiene un tamaño de $19\ \mu m$.

Además, mediante una micrografía tomada con el microscopio electrónico a una magnificación de 100X (ver Anexo I) de la muestra temple (agua) y revenido, se puede observar que los carburos están distribuidos aleatoriamente en toda la matriz austenítica, según (GARCÍA, y otros, 2010) una buena distribución de carburos en toda la matriz da como resultado una mayor dureza.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se establece que la microestructura presente en las muestras sometidas a diferentes tratamientos es austenita sin cambio de fase con presencia de carburos de manganeso en los límites de grano y dentro del mismo a excepción de la muestra en estado de suministro donde no se encontraron carburos en los

límites de grano (ver Anexo J). Los carburos presentes son de tipo alargado, los cual se relaciona con las propiedades de dureza y desgaste, la microestructura que presenta mejor distribución en cuanto a carburos se refiere son las muestras que fueron sometidas a temple (agua) y revenido, de ahí que se produjo un aumento de su dureza.

5.3. Resultados del ensayo de desgaste

Los resultados obtenidos durante este ensayo se basan en el análisis de desgaste en las muestras que se encuentran en estado de suministro y tratadas térmicamente, es decir se describen las características principales en relación al ensayo de desgaste según la norma ASTM G65; es decir, tipo de procedimiento, características del material abrasivo, condiciones de funcionamiento del equipo; y en cuanto a muestras, detalla el tipo de material, tratamiento térmico en caso de existir, dureza (considerado como un factor fundamental dentro del proceso de desgaste), tipo de preparación de las muestras además de sus características determinadas por ensayo.

Resultados de las muestras en estado de suministro.

Para visualizar los resultados obtenidos en las muestras en estado de suministro en el Cuadro 8-4 se presenta la ficha de reporte del ensayo de desgaste, en base a resultados obtenidos en los cuadros 22-4 y 23-4, además de cálculos previos realizados.

Tabla 3-5: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras en estado de suministro.

Ensayo de disco con caucho / Abrasivo seco				
Procedimiento ASTM G65: B				
Material abrasivo:	Arena de sílice F70			
Ajuste de volumen perdido AVL	250,180	mm ³	Tiempo de ensayo:	10 min
Coefficiente de variación	10	%	Cantidad aprox.:	2355 g
Datos del ensayo				
Descripción del material	Acero al manganeso (13,65 %Mn)		Rpm:	205
Tratamiento térmico	Ninguno		Dureza del disco:	232 HBW
Dureza	14 HRC		Ancho de disco:	1/2 pulg.
Preparación de la superficie	Corte y pulido		Diámetro de disco:	9 pulg.
Probeta N°	1	2	3	4

Tabla 4-5: (Continua) Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras en estado de suministro.

Largo de la probeta (mm)	76	76,8	76,5	76,4
Ancho de la probeta (mm)	25,2	26	26	25,4
Espesor de la probeta (mm)	12	12	12	12,1
Carga (N)	130	130	130	130
Flujo de arena (gr/min)	275	275	275	275
Masa inicial (gr)	183,65	183,55	183,68	183,27
Masa final (gr)	181,87	181,43	182	181,14
Masa perdida (gr)	1,78	2,12	1,68	2,14
Densidad (gr/cm³)	7,9913	7,6601	7,6956	7,8055
Volumen perdido (mm³)	222,741	276,756	218,304	274,164
Volumen perdido corregido AVL	224,707	279,198	220,231	276,584
Comentarios:	El pesaje de la muestras se realizó con una balanza técnica analítica marca RADWAG modelo PS 4500.R2 existente en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas (ESPOCH)			
Nombre de la empresa:	XXXXXXXXXX			
Técnico del Laboratorio:	Jesica Caiza / Lorena Córdova			
Fecha de realización:	08 – Enero – 2018			

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

Se puede apreciar que el volumen perdido corregido promedio fue de 250 milímetros cúbicos, además considerando que el coeficiente de varianza es el parámetro que indica si se encuentra bajo control el proceso de desgaste, dentro del cual se determinó que el procedimiento se ajustó con el límite permitido de 10%.

Resultados de las muestras tratadas térmicamente, temple en agua.

En el cuadro 9-4 se visualizan los resultados generados en las muestras tratadas térmicamente, es decir temple a 925°C con enfriamiento en agua a temperatura del entorno (20°C aproximadamente) y revenido a 705°C con enfriamiento en horno (temperatura ambiente), se elabora la ficha de reporte del ensayo de desgaste en base a resultados obtenidos en el cuadro 24-4 y cuadro 25-4, además de cálculos previos realizados.

Tabla 5-4: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras tratadas térmicamente, temple en agua.

Ensayo de disco con caucho / Abrasivo seco				
Procedimiento ASTM G65: B				
Material abrasivo:	Arena de sílice F70			
Ajuste de volumen perdido AVL	55,572	mm ³	Tiempo de ensayo:	10 min
Coefficiente de variación	9,35	%	Cantidad aprox.:	2355 g
Datos del ensayo				
Descripción del material	Acero al manganeso (13,65 %Mn)		Rpm:	205
Tratamiento térmico	Temple (925°C): enfr. agua, Revenido (705°C)		Dureza del disco:	232 HBW
Dureza	24 HRC		Ancho de disco:	1/2 pulg.
Preparación de la superficie	Corte y pulido		Diámetro de disco:	9 pulg.
Probeta N°	1	2	3	4
Largo de la probeta (mm)	76,5	76,5	75,8	76,5
Ancho de la probeta (mm)	26	26	25	26
Espesor de la probeta (mm)	11,5	12	12	12
Carga (N)	130	130	130	130
Flujo de arena (gr/min)	275	275	275	275
Masa inicial (gr)	176,59	181,22	180,53	181,26
Masa final (gr)	176,1	180,83	180,1	180,87
Masa perdida (gr)	0,49	0,39	0,43	0,39
Densidad (gr/cm ³)	7,720	7,593	7,938	7,594
Volumen perdido (mm ³)	63,469	51,359	54,163	51,354
Volumen perdido corregido AVL	64,029	51,812	54,641	51,807
Comentarios	El pesaje de la muestras se realizó con una balanza técnica analítica marca RADWAG modelo PS 4500.R2 existente en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas (ESPOCH)			
Nombre de la empresa	XXXXXXXXXX			
Técnico del Laboratorio	Jesica Caiza / Lorena Córdova			
Fecha de realización	08 – Enero – 2018			

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autor

El volumen perdido corregido promedio para las muestras tratadas térmicamente con temple en agua, se observa que fue de 56 milímetros cúbicos y el proceso de desgaste se calificó aproximadamente 9% por debajo del límite permitido, determinando así que el

proceso se encuentra bajo control.

Resultados de las muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.

En cuadro 10-4 se puede visualizar los resultados obtenidos en las muestras tratadas térmicamente, es decir temple a 925°C con enfriamiento en aceite a temperatura del entorno (20°C aproximadamente) y revenido a 705°C con enfriamiento en horno (temperatura ambiente), se elabora la ficha de reporte del ensayo de desgaste en base a resultados obtenidos en el cuadro 26-4 y cuadro 27-4, además de cálculos previos realizados.

Tabla 6-5: Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.

Ensayo de disco con caucho / Abrasivo seco				
Procedimiento ASTM G65: B				
Material abrasivo:	Arena de sílice F70			
Ajuste de volumen perdido AVL	324,033	mm3	Tiempo de ensayo:	10 min
Coefficiente de variación	4,8	%	Cantidad aprox.:	2355 g
Datos del ensayo				
Descripción del material	Acero al manganeso (13,65 %Mn)		Rpm:	205
Tratamiento térmico	Temple (925°C), enfr. Aceite; Revenido (705°C)		Dureza del disco:	232 HBW
Dureza	21 HRC		Ancho de disco:	1/2 pulg.
Preparación de la superficie	Corte y pulido		Diámetro de disco:	9 pulg.
Probeta N°	1	2	3	4
Largo de la probeta (mm)	76	76	75,8	76
Ancho de la probeta (mm)	26	25,3	25	25,2
Espesor de la probeta (mm)	11,5	11,5	12	11,8
Carga (N)	130	130	130	130
Flujo de arena (gr/min)	275	275	275	275
Masa inicial (gr)	176,32	181,3	180,63	182,5
Masa final (gr)	173,82	178,87	177,97	179,87
Masa perdida (gr)	2,5	2,43	2,66	2,63
Densidad (gr/cm3)	7,7591	8,1991	7,9432	8,0754
Volumen perdido (mm3)	322,198	296,374	334,874	325,678
Volumen perdido corregido AVL	326,483	300,315	339,327	330,009

Tabla 7-5: (Continua) Ficha de Reporte del ensayo de desgaste de muestras tratadas térmicamente, temple en aceite.

Comentarios	El pesaje de la muestras se realizó con una balanza técnica analítica marca RADWAG modelo PS 4500.R2 existente en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas (ESPOCH)
Nombre de la empresa	XXXXXXXXXX
Técnico del Laboratorio	Jesica Caiza / Lorena Córdova
Fecha de realización	08 – Enero – 2018

Realizado por: Lorena Córdova

Fuente: Autores

El ensayo de desgaste en las muestras tratadas térmicamente con temple en aceite indica un volumen perdido corregido promedio de 324 milímetros cúbicos y además se determinó que el proceso se encuentra bajo control con un 4% aproximadamente.

Parcialmente se determina que las muestras que fueron sometidas a temple en agua y revenido presentan el menor desgaste o pérdida en su masa y volumen en comparación con los otros dos procesos de desgaste, además también se debe considerar que la dureza en este tipo de muestras es mayor respecto al resto de muestras.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

Una vez que se realizaron ensayos de espectrometría se concluyó que las placas de molienda están fabricadas de una aleación de manganeso siendo sus constituyentes principales: 0,7%C, 13,3%Mn, 0,267%Si y otros elementos aleantes con cantidades no significativas, de acuerdo a estos porcentajes se estableció que se trataba de un acero al manganeso de tipo D según las especificaciones de la norma ASTM 128.

El método de endurecimiento utilizado fue el temple y revenido en agua y en aceite; la temperatura de austenización fue de 925°C con un tiempo de permanencia de 30 minutos y una temperatura de revenido de 705°C con un tiempo de permanencia de 45 minutos.

Las muestras luego del análisis EDS en las partículas que se presentaron contienen carbono (C) y manganeso (Mn). La presencia de carbono y manganeso incrementaron la dureza del material al ser sometido a tratamientos térmicos de temple y revenido.

Los valores de dureza Vickers comprobaron que la presencia de otros compuestos químicos distribuidos en la matriz como carbono (C) y manganeso (Mn) influyen en el incremento de dureza del material y por ende mejora su resistencia al desgaste.

Las muestras que fueron sometidas al tratamiento térmico de temple y revenido incrementaron la dureza: con el temple (agua) y revenido se obtuvo una dureza de 24HRC y con el temple (aceite) y revenido una dureza de 21HRC, por la formación de carburos que muy probablemente contienen manganeso, los cuales están distribuidos aleatoriamente en toda la matriz austenítica en el caso del temple en agua y revenido.

En el ensayo de desgaste se pudo comprobar que las probetas que fueron templadas en agua presentaron un volumen perdido de 56 mm^3 , siendo estas las que presentaron mayor resistencia al desgaste que las probetas en estado de suministro y las probetas que fueron

templadas en aceite.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda cambiar los tiempos y temperaturas de temple y revenido establecidas en el presente documento con el fin de determinar incrementos de dureza.

Se recomienda que para futuras investigaciones realizar ensayos de fatiga e impacto para determinar un punto de equilibrio entre dichas propiedades.

Realizar ensayos de X ray diffraction (XRD) para determinar la composición química específica de los carburos presentes.

Se recomienda realizar un Mapeo de Espectrometría de Energía Dispersa (EDS Mapping) para conocer la distribución de cada compuesto químico dentro de la inclusión.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Schafer, Julio Alberto. *Explotación minera, preparación y concentración.* [En línea], 2016. [Consultado el: 11 de Enero de 2018.] Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmII/2.pdf>.

ALRO. *Steel smart grid.* [En línea], 2015. [Consultado el: 3 de Octubre de 2017.] Disponible en: <https://myalro.com/SmartGrid.aspx?PT=Steel&Clear=true>.

Andrea Blanco, Emilio. "Molienda". *Open course ware.* [En línea] 2012. [Consultado el: 2 de Abril de 2017.] Disponible en: http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/tecnologia-mineralurgica/materiales-de-clase-1/8._molienda.pdf.

ASM International. *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys.* 9na ed. Estados Unidos : Metals Handbook, 1985. pp. 452.

ASM International . *Steel Castings Handbook.* 6ta ed., Estados Unidos : Metals Handbook, 1995. pp. 245.

ASM International. *Properties and Selections selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.* Estados Unidos, 1990. pp. 315

ASTM E3-95. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.*

ASTM E407-07. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.*

ASTM G65-04. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.*

ASTM E415-14. *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.*

ASTM E10-01. *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.*

ASTM E140-02. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.*

ASTM E18-17. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.*

Banco Central del Ecuador. *Reporte de minería.* [En línea] enero de 2017. [Consultado el: 18 de Mayo de 2017.] Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012017.pdf>.

Banco Central del Ecuador. *Sector Minero.* [En línea] 2017. [Consultado el: 25 de mayo de 2017.] Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cartilla00.pdf>.

Buffalo, schutte. *The basic principles of particle size reduction.* [En línea] [Consultado el: 06 de febrero de 2018.] Disponible en: <https://www.slideshare.net/clkbro/how-does-a-hammer-mill-works>.

Calero Calero, Freddy Vidal, & Carrera Guanoluiza, Damián Alexander. Diseño y construcción de una máquina para ensayos en desgaste abrasivo según norma técnica ASTM G65 / COGUANOR 41087 h2 (Trabajo de Titulación). ESPOCH, Mecánica, Ingeniería Mecánica. Riobamba, Ecuador. 2015. pp 8 - 17.

Callister Jr., William D. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 5ta ed.* D.F., México: REVERTÉ, 2002. pp. 291 - 341.

Cañizares Silva, Cristhian Fabián, & Quinchuela Paucar, Juan Carlos. Tecnologías para la recuperación por soldadura de alabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA 6NM (UNS J91540) (Trabajo de Titulación). ESPOCH, Mecánica, Ingeniería Mecánica. Riobamba, Ecuador. 2017. pp. 24.

Castro, Guillermo. *Fundiciones.* [En línea] Febrero de 2009. [Consultado el: 16 de Abril de 2017.] Disponible en: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Fundiciones.pdf.

Duque Escobar, Gonzalo. *Manual de geología para ingenieros.* [En línea] 2016. [Consultado el: 11 de mayo de 2017.] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>.

Estudios Mineros del Perú S.A.C. *Manual de minería.* [En línea] 2012. [Consultado el: 21 de Marzo de 2017.] Disponible en: http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf.

García Cueto, Esther. *Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado.* [En línea] Septiembre de 2016. [Consultado el: Febrero de 15 de 2018.] Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9156/386972.pdf?sequence=1>.

García, A.; et al. *Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste.* [En línea] 2010. [Consultado el: 25 de Mayo de 2017.] Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1158/1169>.

Higuera Cobos, Óscar Fabián; et al. "Evolución microestructural del acero austenítico al manganeso sometido a tratamiento térmico de temple y revenido". *Scielo* [En línea] 06 de octubre de 2010. [Consultado el: 12 de noviembre de 2017.] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v9n17/v9n17a17.pdf>.

Higuera, Oscar Fabián; et al. "Fundamentos teóricos de los aceros auteníticos al manganeso (aceros hadfield)". UTP. [En línea] Mayo de 2007. [Consultado el: 24 de Agosto de 2017.] Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5599/3091>.

Iglesias, Calos E. & Schulz, Bernd. *Aceros Austeníticos al Manganeso.* [En línea] Junio de 2004. [Consultado el: 15 de Octubre de 2017.] Disponible en: http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/2_-_aceros_austenisticos_al_manganeso_breve_resena_historica_carlos_iglesias_t_bernd_schulz.pdf.

INDUSTRIAS I. *Apunte Molienda, Molienda - Universidad de Buenos Aires.* [En línea] Enero de 2015. [Consultado el: 2 de Abril de 2017.] Disponible en: http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf.

Kalpakjian, Serope; & Schmid, Steven R. *Manufactura, ingeniería y tecnología. 4ta ed.* México : Prentice Hall, 2002. pp. 112

Ministerio de Minería - Ecuador. "Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero". *Política Pública PNDSM.* [En línea] Noviembre de 2016. [Consultado el: 19 de Marzo de 2017.] Disponible en: <http://www.mineria.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo-del-sector-minero/>.

Monreal Saavedra, Rogelio & Hernández Rábago, Pedro Ygnacio. *Mi Mexico es minero.* 3ra ed. Mexico : Bienio, 2015. ISBN 978-607-95292-9-1. pp. 11.

Pérez Patiño, Juan Antonio. Tratamientos termicos de los aceros. (Trabajo de titulación) (Maestría). UANL, Ingeniería Mecánica y Eléctrica. San Nicolas de los Garza, Mexico. 1996. pp. 24. [En línea] 29 de marzo de 1996. [Consultado el: 2017 de noviembre de 18.] Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>.

Puente Sanchez, Joel. Tratamiento térmico de templado de los aceros aleados (Trabajo de titulación) (Maestría). UANL, Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Monterrey, Mexico. 1981. pp. 15-16. [En línea] 16 de marzo de 1981. [Consultado el: 06 de diciembre de 2017.] Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/29/1/1020070562.PDF>.

Quimico Global S.A. & C.V. *La Mineía en Mexico*. [En línea] 16 de Diciembre de 2014. [Consultado el: 10 de mayo de 2017.] Disponible en: <https://quimicoglobal.mx/lamineria-en-mexico/>.

Sanchez, Edison & García, Jesús. *Mecanismos de endurecimientos de metales y aleaciones*. [En línea] 10 de Febrero de 2015. [Consultado el: 15 de Agosto de 2017.] Disponible en: <https://es.scribd.com/document/255289596/Mecanismos-de-Endurecimiento-de-Metales-y-Aleaciones>.

SEDPGYM-ECUADOR. *Zonas Mineras del Ecuador*. [En línea] Marzo de 2013. [Consultado el: 13 de abril de 2017.] Disponible en: <http://sedpgym-ecuador.blogspot.com/2013/03/zonas-mineros-del-ecuador.html>.

Smith, William F.; & Hashemi, Javad. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. 4ta ed. D.F., Mexico : Mc Graw Hilll, 2004. ISBN 970-10-5638-8, pp 363 - 366.

Universidad Autonoma de Ciudad Juarez. *Los minerales*. [En línea] Agosto de 2016. [Consultado el: 13 de noviembre de 2017.] Disponible en: <http://www.uacj.mx/ICB/UEB/Documents/Hojas%20tecnicas/Minerales.pdf>.

Valencia Giraldo, Asdrúbal. *El acero hadfield revisitado* . [En línea] 2012. [Consultado el: 15 de Febrero de 2018.] Disponible en: http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/5787/1/ValenciaAsdrubal_2012_acerohadfieldrevisitado.pdf.

Vallejo Velásquez, Juan Carlos. *Manual de Geología*. [En línea] Marzo de 2014. [Citado el: 11 de Octubre de 2017.] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/48418/19/losminerales.pdf>.

